

## Hybrid amplifier system for short optical laser pulse for optical communications

**Publication number:** DE19717367

**Publication date:** 1997-10-30

**Inventor:** GALVANAUSKAS ALMANTAS DR (US); HARIHARAN ANAND DR (US); HARTER DONALD J DR (US)

**Applicant:** IMRA AMERICA INC (US)

**Classification:**

**- international:** *G02B6/00; G02F1/35; G02F1/37; H01S3/00; H01S3/06; H01S3/07; H01S3/098; H01S3/10; H01S3/107; H01S3/108; H01S3/16; H01S3/23; G02B6/00; G02F1/35; H01S3/00; H01S3/06; H01S3/098; H01S3/10; H01S3/106; H01S3/108; H01S3/16; H01S3/23; (IPC1-7): H01S3/105; H01S3/11; H01S3/16*

**- European:** H01S3/00F1; H01S3/23

**Application number:** DE19971017367 19970424

**Priority number(s):** US19960637956 19960425

**Also published as:**



US5847863 (A1)

JP2004048020 (A)

JP10073851 (A)

**Report a data error here**

### Abstract of DE19717367

The amplifier system has a compact expander which receives light pulses and outputs expanded light pulses. An optical amplifier amplifies the expanded pulses. A compressor which compresses the amplified pulses has at least one light path in which the amplified pulse is collimated. The compressor has a lens arrangement into which the light path is included and which collimates the amplified pulses. The compressor contains a collimation diffraction grid and a reflector; the lens arrangement is placed between them.

---

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



DEUTSCHES  
PATENTAMT

②① Aktenzeichen: 197 17 367.5  
②② Anmeldetag: 24. 4. 97  
②③ Offenlegungstag: 30. 10. 97

DE 197 17 367 A 1

③① Unionspriorität:

637956 25.04.96 US

⑦① Anmelder:

IMRA America, Inc., Ann Arbor, Mich., US

⑦④ Vertreter:

Tiedtke, Bühling, Kinne & Partner, 80336 München

⑦② Erfinder:

Galvanauskas, Almantas, Dr., Ann Arbor, Mich., US;  
Hariharan, Anand, Dr., Ann Arbor, Mich., US; Harter,  
Donald J., Dr., Ann Arbor, Mich., US

⑤④ Hybridverstärker für kurze Pulse mit phasenfehldeckungskompensierten Pulsdehnern und -kompressoren

⑤⑦ Es ist ein System zur Verstärkung ultrakurzer optischer Pulse offenbart. Das offenbarte System hat eine verringerte Größe und eine verbesserte Robustheit, Zuverlässigkeit und Kosten-Nutzenwirksamkeit. Die offenbarte Erfindung ist insbesondere wirksam bei Systemen mit chirp-modulierter Pulsverstärkung (CPA), wobei die Pulse gedehnt, verstärkt und rekomprimiert werden. Gemäß einem Gesichtspunkt der Erfindung wird ein kompakter Dehner mit einem massiven Kompressor verwendet und die Kompatibilität zwischen beiden wird durch Einfügen eines Teleskops in die Bahn des kollimierten Strahls erreicht. Wahlweise wird die Kompatibilität des Dehnens und des Kompressors durch Erzeugen eines nicht linear chirp-modulierten Bragg-Gitters in dem Faserdehner erreicht. Gemäß einem anderen Gesichtspunkt der Erfindung werden ein Faser- und Massivverstärker verwendet, um den Puls zu verstärken, und die Kompatibilität zwischen beiden wird durch Einfügen eines Verdoppelungskristalls in die Bahn des Pulses zwischen den beiden Verstärkern erreicht. Ein anderer Gesichtspunkt des offenbarten Verstärkungssystems ist das Pumpen des Laserverstärkers mit einer Laserpumpe des gleichen Materials wie der Laserverstärker aber mit einem Betrieb unter unterschiedlichen Bedingungen.

DE 197 17 367 A 1

Die Erfindung bezieht sich auf Lasertechnologie. Insbesondere bezieht sich die Erfindung auf eine Verstärkung von ultrakurzen optischen Pulsen. Ziel ist die Verringerung der Größe und die Verbesserung der Robustheit, der Zuverlässigkeit und der Kosten-Nutzenwirksamkeit solcher Verstärkungssysteme.

Auf Grund den Beschränkungen bei Pulsspitzenleistungen in optischen Bauteilen eines Verstärkers wird eine Verstärkung ultrakurzer Pulse typischerweise durch eine Chirppulsverstärkung (Chirped Pulse Amplification) CPA erreicht (D. Strickland and G. Mourou, "Compression of Amplified Chirped Optical Pulses," Opt. Commun. 56, 219 (1985)). Bei diesem Verfahren werden anfänglich ultrakurze Pulse zu einer ausreichenden Dauer (typischerweise 0,1–1 ns) aufgedehnt, wodurch nicht tolerierbare Spitzenleistungen innerhalb eines Verstärkers verhindert werden, die dann verstärkt werden und rekomprimiert werden, um die anfängliche kurze Dauer wiederherzustellen.

Gegenwärtig ist CPA eine allgemeine Technik, die in einer Vielzahl von Lasersystemen eingesetzt wird, die unterschiedliche Ausgangspulsenergien, -auern und -wellenlängen haben. Außer der Suche nach höheren Energien und kürzeren Dauern, wurden intensive Anstrengungen auf die Entwicklung von kommerziellen Systemen gerichtet. Allgemeine Anforderungen für jedes Lasersystem, das kommerziell erfolgreich sein soll, bestehen aus der Kompaktheit, der Robustheit, der Zuverlässigkeit und der Kosten-Nutzenwirksamkeit. Der Hauptnachteil der gegenwärtigen Hochenergie-CPA-Systeme ist ihre beträchtliche Komplexität und Größe. Gegenwärtig bestehen teure und große Systeme, die ein hoch spezialisiertes Personal und eine kostenintensive Wartung erfordern.

Ein typisches GPA-System besteht aus einer Pulsquelle, Pulsdehnungs- und -rekompansionsanordnungen und einem optischen Verstärker. Für Hochenergie-Systeme (mit Ausgangspulsenergien im Bereich zwischen Mikrojoule bis Joule) müssen Pulsdehner eine große Gruppengeschwindigkeitsdispersion (GVD) haben, um Dehnungsverhältnisse im Bereich zwischen  $10^3$ – $10^5$  zu erreichen. Ein Pulskompressor sollte ein entsprechendes Kompressionsverhältnis haben und er sollte zusätzlich nicht gegen Beschädigungen anfällig sein und er sollte keine Pulsstörungen bei hohen Spitzenleistungen von rekomprimierten Pulsen hervorrufen. Gegenwärtig können alle vorstehend genannten Anforderungen für ein Hochenergie-System nur durch Verwendung von Beugungsgittern sowohl in den Dehnern als auch in den Kompressoren eingehalten werden.

Eine negative GVD wird herkömmlich mit einem Paar paralleler Beugungsgitter (allgemein bekannt als Treacy-Konfiguration) (siehe E. B. Treacy, "Optical Pulse Compression With Diffraction Gratings," IEEE J. Quant. Electr. QE-5,454 (1969)) erhalten. Eine positive GVD wird herkömmlich mit antiparallelen Gittern und einem dazwischen liegenden Teleskop (Martinez-Konfiguration) (siehe O. E. Martinez, "3000 Times Grating Compressor with Positive Group Velocity Dispersion: Application to Fiber Compression in 1,3–1,6  $\mu$ m Region," IEEE J. Quant. Electr. QE-23,59 (1987)) erhalten. Eine Treacy-Konfiguration mit hohen Energien ist zur Pulscompression vorzuziehen, weil sie die Abwesenheit von jeglichem zusätzlichem Material zwischen den Gittern weniger anfällig für optische Schäden und nicht lineare Effekte macht. Ein perfekte Übereinstimmung zwischen der Dehner- und Kompressor-GVD erfordert identische Gitter, die mit identischen Einfallswinkeln, Identischen Abständen zwischen den Gittern angeordnet werden müssen, wobei das Teleskop frei von Aberrationen sein muß. In der Praxis ist eine solche perfekte Übereinstimmung aufgrund der zusätzlichen GVD der optischen Verstärkerkomponenten, der Aberrationen des Teleskops und sehr engen Ausrichtungstoleranzen für Femtosekunden-Pulse schwierig zu erreichen (beispielsweise B. E. Lermoff and C. P. J. Barty, "Quintic-phase-limited, spatially uniform expansion and recompression of ultrashort optical pulses," Opt. Lett. 18, 1651 (1993)).

Das Hauptproblem der Verwendung von Beugungsgittern liegt darin, daß derartige Anordnungen sehr groß sind. Um eine Pulsausdehnung auf ungefähr 1 ns zu erreichen, wird typischerweise eine Gittertrennung um 1–2 m erforderlich. Solche Entfernungen werden insbesondere bei kompakten auf Fasern beruhenden CPA-Systemen unakzeptabel.

Es wurden Versuche gemacht, um teilweise dieses Problem durch Verwendung von kompakten Dehnern (beispielsweise Fasern) als Ersatz für das Beugungsgitterpaar zu überwinden. Das würde eine beträchtliche Verringerung der Gesamtabmessung der Dehnungs-/Kompressionsanordnung erlauben. Die ursprüngliche Arbeit bei CPA-Verstärkung hat eine optische Standardfaser zur Dehnung der anfänglichen Pulse und Beugungsgitter zur Pulsrekompierung verwendet. Fasern können zur Pulsrekompierung nicht verwendet werden, weil sie einen niedrigen Schwellwert für nicht lineare Effekte haben. Das Problem hier besteht darin, daß sowohl eine Vorrichtung, die auf optischen Fasern beruht, als auch eine Vorrichtung, die auf einem Beugungsgitterpaar beruht, nicht nur lineare GVD-Glieder sondern auch GVD-Glieder höherer Ordnung aufweist, die für jede der Vorrichtungen sehr unterschiedlich sind, wodurch es unmöglich wird, daß ihre GVD perfekt übereinstimmen. Beispielsweise gibt dies bei einem großen Dehnungsverhältnis eine große GVD-Fehldeckung dritter Ordnung, die für rekomprimierte Pulsauern auftritt, die enger als 1 ps sind (P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot, und G. Mourou, "Generation of Ultrahigh Peak Power Pulses by Chirped Pulse Amplification," IEEE J. Quant. Electron. QE-24, 398 (1988)).

Kürzlich wurde eine Lösung vorgeschlagen, um eine perfekte Übereinstimmung dritter Ordnung für Pulse mit 100 fs zwischen einem Faserdehner und einem Beugungsgitterkompressor, der direkt auf ein Prismafläche ("Prisma") geschrieben war, zu erhalten (S. Kane and J. Squier, "Grating Compensation of Third-Order Material Dispersion in the Normal Dispersion Regime: Sub-100-fs Chirped-Pulse Amplification Using a Fiber Stretcher and Grating-Pair Compressor," IEEE J. Quant. Electron. QE-31, 2052 (1995)). Diese Lösung leidet jedoch an schwerwiegenden Beschränkungen. Erstens kompensiert es keine GVD vierter oder höherer Ordnung, die wichtig für größere Dehnungsverhältnisse und für Pulse sind, die kürzer als 100 fs sind. Zweitens wurde nur für einen Wellenlängenbereich von ungefähr 800 nm nachgewiesen, in dem die lineare GVD groß ist und das Verhältnis der lineare/nicht lineare GVD in einer Faser von der Größe her nahe an dem eines Gitterpaares liegt.

Bei beispielsweise 1550 nm ist dieses Konzept sehr schwierig einzusetzen, weil ein viel größerer Unterschied der GVD dritter Ordnung vorliegt. Folglich ist dieses Schema sehr grob und ergibt einen beschränkten Betrag der nicht linearen GVD. Es kann nicht dazu verwendet werden, willkürliche Beträge von nicht linearen GVD-Fehldeckungen zu kompensieren.

Eine Lösung zum Erhalten einer abstimmbaren Regelung der Dispersion dritter und vierter Ordnung wurde vorgeschlagen in W. E. White, F. G. Patterson, R. L. Combs, D. F. Price, und R. L. Shepherd, "Compensation of higher-order frequency-dependent phase terms in chirped-pulse amplification systems," *Opt. Lett.* 18, 1343 (1993)), wobei Aberrationen eines Linsenduplets in einem Martinez-Dehner ausgenutzt wurden. Diese Regelung der dritten und vierten Ordnung wurde vorgeschlagen, um eine sehr feine Abstimmung der Phase der rekomprimierten Pulse zu erzielen, um die Pulswiedergabetreue einer Standardkonfiguration bestehend aus einem Beugungsgitter-Dehner und einem Kompressor zu erhöhen. Ein achromatisches Duplet wurde als (eine) Linse in einer Umlenk-Martinez-Teleskopanordnung zum Kollimieren des gebeugten divergierenden Strahls von einem Gitter in einer Beugungsebene und zum gleichzeitigen Fokussieren desselben Strahls auf einen Umlenkspiegel eingesetzt, der in einer zur Beugung senkrechten Ebene steht. Eine solche Ausgestaltung erlaubt die Regelung einer nicht linearen GVD, indem die negativ und positiv gekrümmten Linsen des Duplets relativ zueinander bewegt werden.

Die Größe der nicht linearen GVD, die mit diesem Verfahren erreichbar ist, ist jedoch systembedingt sehr gering. Ein achromatisches Duplet ergibt nur einen kleinen Betrag von Aberrationen. Aufgrund dem Erfordernis der Erhaltung der gleichzeitigen Kollimierung und Fokussierung in senkrechten Ebenen können die Linsen nicht weiter als ein Bruchteil eines Millimeters bewegt werden. Das ergibt den einstellbaren Betrag der mit diesem Schema erreichbaren GVD dritter und vierter Ordnung von jeweils nur  $\approx 10^{-40} \text{ s}^3$  und  $\approx 10^{-52} \text{ s}^4$ . Dies ist Größenordnungen geringer als die  $\approx 10^{-35} \text{ s}^3$  und  $\approx 10^{-49} \text{ s}^4$ , die jeweils bei der Regelung dritter und vierter Ordnung erforderlich sind, um für die GVD zwischen  $\approx 1 \text{ km}$  der Faser und einem Beugungsgitterpaar in Übereinstimmung zu bringen. Gegenwärtig gibt es kein bekanntes Verfahren zum Kompensieren einer derart großen GVD-fehldeckung zwischen einem unterschiedlichen Dehner und einem Kompressor.

Bezüglich ihrer Größe und ihrer Ertragsarten können Mediumverstärkungsanordnungen für CPA-Verstärkungen in zwei Hauptgruppen aufgeteilt werden. Die einen sind auf Fasern beruhende Verstärker (A. Galvanuskas, M. E. Fermann, P. Blixt, J. A. Tellefsen, D. Harter, "Hybrid diode-laser fiber-amplifier source of high-energy ultrashort pulses," *Opt. Lett.* 19, 1043 (1994)) und die anderen sind auf massiven Festkörpern beruhende Verstärker (P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot, und G. Mourou, "Generation of Ultrahigh Peak Power Pulses by Chirped Pulse Amplification," *IEEE J. Quant. Electron.* QE-24, 398 (1988)). Faserverstärker sind im Vergleich zu Festkörpern wesentlich kompakter und robuster. Ihre maximalen Pulsenergien sind jedoch durch die enge Querschnittfläche des verstärkenden Mediums beschränkt (ein typischer Einzel-Modus-Faserkern hat nur ungefähr 5–10  $\mu\text{m}$  Durchmesser). Fasersysteme können eine Pulsenergie bis zu 10–100  $\mu\text{J}$  liefern, was viel weniger als  $\approx 1 \text{ J}$  ist, das mit einem Festkörpersystem erzielbar ist.

Es wurden Versuche gemacht, um bei der Abmessung eines CPA-Systems Kompromisse einzugehen, indem kompakte Quellen mit Festkörperversstärkern kombiniert wurden. Halbleiterdiodenlaser und frequenzverdoppelte Faserlaser wurden zur Erzeugung von ultrakurzen Pulsen verwendet, die in ein Festkörper-CPA-Verstärkungssystem eingespeist wurden (A. Hariharan, M. E. Fermann, M. L. Stock, D. Harter, und J. Squier, "Alexandrite-pumped alexandrite regenerative amplifier for femtosecond pulse amplification," *Opt. Lett.* 21, 128 (1996); P. J. Delfyett, S. Grantham, K. Gabel, A. Yusim, S. Gee, M. Richardson, G. Alphonse, J. Connolly, "Ultrafast semiconductor-laser-diodeseeded CR: LiSAF regenerative amplifier system," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 1995 Technical Digest Series, Vol. 15 (Optical Society of America, Washington, D.C., 1995), paper CThM6). Die Hauptnachteile dieser Schemen sind die niedrigen Energien der eingespeisten Pulse, die in einem hochverstärkten Spontanemission (ASE)-Hintergrund von dem Verstärker und einer starken Ertragsschmälerungswirkung resultieren, sowie die Unfähigkeit, die Systemgröße weiter zu verringern, indem kompakte Halbleiter- oder Faserverstärker bei den ersten CPA-Verstärkungsstufen verwendet werden. Letzteres beruht auf der Tatsache, daß die Halbleiterverstärker keine wesentlichen Pulsenergien ( $< 100 \text{ pJ}$ ) vorsehen, und daß die Faserverstärker mit langen Wellenlängen (1,55  $\mu\text{m}$ ) betrieben werden, die weit entfernt von den typischen Wellenlängen (ungefähr 800 nm) von Festkörperversstärkern sind.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Hybridgestaltungen für Chirppulsverstärkungssysteme mit sowohl einem Dehner als auch einem Kompressor und einem optischen Verstärker zur Erzeugung von ultrakurzen optischen Hochenergiepulsen zu schaffen, so daß kompakte Komponenten in einer optischen Bahn verwendet werden, in der optische Intensitäten gering sind und massive Komponenten an den letzten Stufen eines Systems verwendet werden, an denen die optischen Spitzenintensitäten für kompakte Komponenten untolerierbar hoch werden. Derartige Hybridgestaltungen verringern wesentlich die Abmessung und die Kosten des Systems und steigern seine Robustheit und Zuverlässigkeit und die verbesserten Leistungseigenschaften wie beispielsweise die Ausgangspulsdauer, -bandbreite, -energie und das Kontrastverhältnis.

Die vorliegende Erfindung hat zwei Hauptgesichtspunkte. Der erste Gesichtspunkt ist die Einrichtung zum Kompensieren einer sehr starken G-D-Fehldeckung zwischen Dehnern und Kompressoren unterschiedlicher Bauart. Eine derartige Kompensation ermöglicht die Kombination von kompakten Dehnungsanordnungen mit massiven Kompressionsanordnungen, wodurch die Gesamtabmessung des Systems drastisch verringert wird. Massive Komponenten sind am Ausgang des Systems bei hohen Pulsenergien notwendig. Gemäß gewissen Ausführungsbeispielen der Erfindung werden optische Aberrationen einer Linsenanordnung oder nicht linear chirp-modulierte Bragg-Gitter für diese Kompensation eingesetzt. Der zweite Gesichtspunkt ist die Einrichtung zur Kombination unterschiedlicher Bauarten von Verstärkungsmedien in einer einzigen Verstärkeranordnung derart, daß keine Pulsdehnung oder -kompression innerhalb des Verstärkers erforderlich ist. Eine wichtige, durch die Erfindung vorgesehene Lösung ist die wirkungsvolle Frequenzumwandlung von lang gedehnten

optischen Pulsen zwischen Verstärkerkaskaden unterschiedlicher Bauart. Diese ermöglicht es wesentliche den Verstärkerteil wesentlich zu verringern.

Erfindungsgemäß kann jedes spezielle CPA-Verstärkungssystem entweder nur eines der beiden Teile umfassen oder beide Teile der Erfindung miteinander kombinieren. Schematisch ist das in Fig. 1(a) und 1(b) gezeigt. Fig. 1(a) zeigt den ersten Gesichtspunkt dieser Erfindung, der sich aus einem kompakten Dehner 20 und einem massiven Kompressor 40 zusammensetzt, die in jedem herkömmlichen nicht hybriden CPA-Verstärkungssystem verwendet werden. Insbesondere weist das beispielhafte System einen Oszillator 10 auf, wie in Fig. 1(a) gezeigt ist, der einen Puls P erzeugt und das geeignete Zeitgebungssignal der Triggerelektronik 50 zusendet. Der Puls P wird in dem kompakten Dehner 20 gedehnt und auf den optischen Verstärker 30 zusammen mit einem Signal von der Triggerelektronik 50 aufgebracht. Der verstärkte Puls AP wird dann durch den massiven Kompressor 40 komprimiert, um den verstärkten komprimierten Puls CP zu erzeugen.

In Fig. 1(b) ist ein Schema einer hybriden CPA-Verstärkungseinspeisung gezeigt, die im allgemeinen eine kompakte Einspeisungsquelle 1 und einen massiven Hochenergieverstärker 2 aufweist. Ein kompakter (Faser-)Oszillator 5 erzeugt die Signalpulse, die anfänglich durch den Dehner 15 gedehnt werden und in einem kompakten (Faser-)Verstärker 25 verstärkt werden. Das anfänglich verstärkte Signal wird auf den optischen Frequenzkonverter 45 aufgebracht, durch den die Frequenz verdoppelt wird, um eine typische Wellenlänge für einen Festkörperverstärker zu erzielen. Dann wird das Signal in einen Hochenergie-(Festkörper)-Verstärker 55 eingespeist und schließlich durch einen massiven Kompressor 65 rekomprimiert. Bei einem herkömmlichen System würde die Triggerelektronik 35 in einer Weise verwendet werden, die ähnlich der in Fig. 1(a) gezeigten Weise ist, mit der Ausnahme, daß der Ausgang des Signals auch auf den kompakten Verstärker 25 und den Hochenergieverstärker 55 aufgebracht werden würde. Wie jedoch später gezeigt wird, ist das System erfindungsgemäß viel kompakter und robuster, indem der Bedarf beseitigt wird, daß die Triggerelektronik das Schalten des Hochenergieverstärkers 55 betreiben muß.

Diese letztere Anordnung kann entweder eine herkömmliche Gestaltung mit einem Dehner und einem Kompressor, die nur auf Beugungsgittern beruhen, oder ein Hybridschema verwenden, das beim ersten Gesichtspunkt der Erfindung vorgeschlagen wird. Wie zuvor erwähnt ist, enthalten beide Systeme in den Fig. 1(a) und Fig. 1(b) zusätzlich eine elektronische Einrichtung zur Synchronisierung der Zeitgebung zwischen den optischen Gattern in den Verstärkungsstufen und dem Oszillator und zur Auswahl der erforderlichen Puls wiederhol frequenz für jede der Stufen.

Merkmale und Vorteile von beiden Gesichtspunkten der vorliegenden Erfindung werden vollständiger aus der Beschreibung von beispielhaften, bevorzugten Ausführungsbeispielen verstanden, die nachstehend folgen.

Fig. 1(a) und Fig. 1(b) zeigen die allgemeine Verwendung der Merkmale der vorliegenden Erfindung in jeweils einem nicht hybriden und hybriden System.

Fig. 2(a), (b) und (c) zeigen jeweils die Anordnungen von herkömmlichen Treacy-, Martinez- und Umlenk-Martinez-Systemen, während Fig. 2(d) die Anordnung eines beispielhaften Ausführungsbeispiels eines Gesichtspunkts der Erfindung zeigt.

Fig. 3 zeigt das Prinzip der Regelung der Phase von ultrakurzen Pulsen gemäß einem Gesichtspunkt der Erfindung, wobei die Fig. 3(a) und Fig. 3(b) Kurven sind, die eine Wellenfrontdeformation  $\Delta\Phi$  einer Welle zeigen, die durch die in Fig. 3 gezeigte Linsenanordnung (Teleskop) hindurchtritt.

Fig. 4(a) und Fig. 4(b) zeigen beispielhafte Teleskopkaskadenanordnungen gemäß der Erfindung.

Die Fig. 5(a)–5(e) zeigen verschiedene Anordnungen zum Verwenden des Teleskops gemäß der Erfindung.

Die Fig. 6(a)–6(h) zeigen verschiedene Systeme gemäß der vorliegenden Erfindung.

Fig. 7 zeigt Verfahren zum Kompensieren einer GVD unter Verwendung von nicht linear chirp-modulierten Fasern gemäß einem Gesichtspunkt der Erfindung.

Fig. 8 zeigt eine beispielhafte Anordnung zur Verwendung von frequenzverdoppelten gedehnten Pulsen zum schnellen Schalten eines Regenerierungsverstärkers.

Fig. 9(a) zeigt eine beispielhafte Linsenanordnung, die durch die Erfinder genutzt wurde, um die vorteilhaften Merkmale eines Gesichtspunktes der vorliegenden Erfindung zu demonstrieren, und Fig. 9(b) und Fig. 9(c) zeigen Zeit-Frequenzdiagramme, die in Wechselbeziehung zu den Graphiken stehen, die in den Fig. 3(a) und Fig. 3(b) gezeigt sind.

Fig. 10(a) zeigt eine beispielhafte Anordnung eines Hybridfaserdehners und eines Alexandrite-CPA-Verstärkungssystems mit einem verdoppelnden Kristall gemäß einem Gesichtspunkt der Erfindung, während Fig. 10(b) eine beispielhafte Verwendung der verdoppelnden Kristalle der vorliegenden Erfindung in einem nicht hybriden CPA-Verstärkungssystem zeigt.

Fig. 11(a) zeigt das zweite harmonische Spektrum, das mit komprimierten Femtosekunden-Pulsen erreicht wird, während Fig. 11(b) das zweite harmonische Spektrum zeigt, das mit 300-Pikosekunden-Pulsen gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung erreicht wird.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die Zeichnungen näher erläutert.

## 1. Anordnungen zur Kompensation von GVD-Fehldeckungen

Die Fähigkeit zur Kompensierung von starken GVD-Fehldeckungen zwischen einem Dehner und einem Kompressor erlaubt eine Kombination sehr unterschiedlicher Anordnungen und folglich eine Verringerung der Abmessung und ein Anstieg der Robustheit des Gesamtsystems durch Verwendung kompakter Anordnungen zum Dehnen.

Zur weiteren Erläuterung ist es nützlich, das Erfordernis zur perfekten Übereinstimmung zwischen dem Dehner und dem Kompressor mathematisch auszudrücken. Ein Puls ist vollständig durch seine Amplitude und

Phase entweder in zeitlichem oder spektralem Gebiet gekennzeichnet. Pulsspektralphasen können um eine Pulsspektrumhauptfrequenz  $\omega_0$  aufgeweitet werden:

$$\Phi(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \beta_3(\omega - \omega_0)^3 + \dots$$

Hier ist  $\omega = 2\pi\nu$  die zyklische Frequenz. Ein Puls hat seine minimale bandbreitenbeschränkte Dauer, wenn alle Glieder außer die der nullten und ersten Ordnung bei dieser Aufweitung Null sind. Glieder erster, zweiter, dritter und höherer Ordnung werden Phasen erster, zweiter, dritter usw. Ordnung bezeichnet. Ein Pulsrückformvorgang des Dehners oder Kompressors wird durch die Glieder bestimmt, die beginnend von der zweiten Ordnung oder höherer Ordnung sind. Die Koeffizienten  $\beta_2, \beta_3$ , usw. bei der Aufweitung von nicht bandbreitenbeschränkten Pulsen geben das Vorzeichen und die jeweilige Größe der Dispersion erster, zweiter usw. Ordnung. Diese Koeffizienten geben die GVD-Eigenschaften eines Dehners oder Kompressors. Perfekt übereinstimmende Dehner und Kompressoren erfordern Dispersionskoeffizienten, die in jeder Ordnung gleich groß und von entgegengesetztem Vorzeichen sind. Wie eingangs der vorliegenden Offenbarung beschrieben ist, wurde bisher die Übereinstimmung erhalten, indem Dehner und Kompressoren in derselben Bauart (beispielsweise auf Beugungsgittern beruhend) gebaut wurden.

Gemäß einem Gesichtspunkt der vorliegenden Erfindung wird das Problem der GVD-Übereinstimmung durch Verwendung eines Aberrationsteleskops gelöst. Während in der gesamten Beschreibung auf ein Teleskop Bezug genommen wird, können jedoch die speziellen Merkmale der Erfindung durch jede Linsenanordnung erreicht werden, die die Kollimation des Strahls bewahrt, während seine Abmessung aufgeweitet, verringert oder erhalten wird.

Herkömmliche Treacy- und Martinez-Konfigurationen sind jeweils in den Fig. 2(a) und (b) gezeigt, die ein erstes Gitter 71, das den Strahl divergiert, und ein zweites Gitter 72 haben, das den Strahl kollimiert. Sie enthalten keine Einrichtung zur Aberrationsregelung von GVD-Gliedern höherer Ordnung. Eine Umlenkkonfiguration in Martinez-Bauweise, die von W. E. White, F. G. Patterson, R. L. Combs, D. F. Price, and R. L. Shepherd, "Compensation of higher-order frequency-dependent phase terms in chirped-pulse amplification systems," Opt. Lett. 18, 1343 (1993) (White et al.) vorgeschlagen ist und ein Duplet 70 in einem Martinez-Teleskop verwendet, um eine Aberration zu regeln, ist in Fig. 2(c) gezeigt. Bei dieser Anordnung divergiert der Strahl in der Ebene der Beugung. Wie zuvor erwähnt ist, gibt diese Anordnung einen sehr beschränkten Bereich der Regelung, der unzureichend für eine Hybrid-Dehner-/Kompressorgestaltung ist.

Anstelle der Ausnutzung einer Aberration eines achromatischen Duplets 70, das in einen divergierenden Strahl von einem Beugungsgitter 75 gesetzt ist, ist erfindungsgemäß ein Teleskop 80 in die Bahn des kollimierten Strahls 85 eingefügt, der von dem Kollimationsgitter 90 austritt, wie in Fig. 2(d) gezeigt ist. Bei den Kompressoren in Martinez-Bauweise, die in den Fig. 2(b) und 2(c) gezeigt sind, würde das Teleskop 80 zusätzlich zu dem bereits bestehenden Teleskop eingeführt werden, das den divergierenden Strahl aufnimmt. Der kollimierte Strahl, der immer in sowohl der Martinez- als auch Treacy-Konfiguration vorhanden ist, wird räumlich in der Ebene der Beugung chirp-moduliert. Wie nachstehend gezeigt ist, ermöglicht eine solche Konfiguration, die Beschränkungen zu überwinden, die in dem durch White et al. vorgeschlagenem System vorhanden sind, und sie ermöglicht, eine um viele Größenordnungen größere Phasenkorrektur zu erzielen, die ausreicht, um große GVD-Fehldeckungen zwischen unterschiedlichen Bauarten von Dehnern und Kompressoren zu kompensieren. Ein Grund liegt darin, daß das Teleskop 80 so gestaltet sein kann, daß viel stärkere Aberrationen als bei einem achromatischen Duplet 70 vorliegen. Weil dieses zusätzliche Aberrationsteleskop von dem Rest der Beugungsgitteranordnung abgetrennt ist, kann es so gestaltet sein, daß sich ein großer Betrag der Phase dritter und vierter Ordnung ergibt, ohne daß andere Parameter des Systems wesentlich beeinflusst werden. Ein zusätzliches Merkmal liegt darin, daß bei dieser Konfiguration Teleskope kaskadiert werden können oder andere Mehrfachlinsengestaltungen können verwendet werden, um den Betrag der Phasenregelung auf den erforderlichen Wert anzuheben, weil kollimierte anstelle fokussierter Strahlen verwendet werden. Schließlich kann dieses Aberrationsregelverfahren im Gegensatz zu dem durch White et al. vorgeschlagenen System bei jeder Bauart einer dispersiven Verzögerungsleitung mit einem kollimierten, räumlich chirp-modulierten Strahl, beispielsweise bei einem Prismakompressor (siehe nachstehendes Beispiel) verwendet werden.

Der Grundsatz der Regelung der Phase von ultrakurzen Pulsen unter Verwendung eines Aberrationsteleskops gemäß einem Gesichtspunkt der Erfindung ist in Fig. 3 gezeigt. Ein kollimierter optischer Strahl tritt durch eine Teleskopanordnung 83, so daß der Ausgangsstrahl auch kollimiert ist. Aufgrund der sphärischen Form der Oberfläche der Linsen 73 und 93 unterliegt der hindurchtretende Strahl in dem Teleskop 83 einer Wellenfrontdeformation  $\Delta\Phi$ , wie in den Fig. 3a und 3b gezeigt ist.  $\Delta\Phi$  ist der Längenunterschied der optischen Bahn zwischen den aberrationsverzerrten und idealen unverzerrten Wellenfronten (gleich dem Phasenunterschied, dem Aberrationen hinzugefügt werden). Gemäß der Seidel-Näherung (M. Born und E. Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press, Oxford, 1975, chps. 5 und 9) kann diese Deformation als eine Überlagerung von Deformationen aufgrund von fünf Hauptaberrationen ausgedrückt werden, die jeweils in Tabelle I aufgelistet sind. Weil der hereinkommende Strahl in beiden Dimensionen senkrecht zur Fortpflanzung kollimiert wird, ist die Betrachtung eines zweidimensionalen Falls ausreichend. In der Tabelle I, ist  $\rho$  der Strahlabstand vom Mittelpunkt des Strahls gemessen in der Ebene der räumlichen Chirp-Modulation. Eine vollständigere Beschreibung der Seidel-Aberrationen kann beispielsweise gefunden werden in M. Born und E. Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press, Oxford, 1975, chps. 5 und 9.

Wenn ein derartiges Teleskop in einem räumlich chirp-modulierten und kollimierten Strahl gesetzt wird, wird diese Wellenfrontdeformation in eine spektrale Phasendeformation transformiert werden. Dies kann erreicht werden, indem beispielsweise ein Teleskop in einen kollimierten, räumlich chirp-modulierten Strahl innerhalb eines Beugungsgitterkompressors gesetzt wird, wobei  $(\omega - \omega_0) \propto \rho$  ist. Es sollte erneut bemerkt werden, daß bei

einer Beugungsgitteranordnung der Strahl nur in einer Richtung (in der Ebene der Beugung) räumlich chirp-moduliert wird. Nach einer Kompression mit einem derartigen Kompressor wird die Pulsspektralphase zusätzliche Phasenkomponenten erwerben, die jeder der fünf Hauptaberrationen entsprechen (siehe Tabelle I).

Tabelle I

Entsprechung zwischen Wellenfront- und Spektralphasen-Verzerrungen durch Seidel-Hauptaberrationen

Hauptaberration	Wellenfront- verzerrung	Entsprechende Spektralphase
Sphärisch	$\Delta\phi \propto \rho^4$	$\Delta\phi \propto (\omega - \omega_0)^4$
Koma	$\Delta\phi \propto \rho^3$	$\Delta\phi \propto (\omega - \omega_0)^3$
Astigmatismus	$\Delta\phi \propto \rho^2$	$\Delta\phi \propto (\omega - \omega_0)^2$
Bildfeldwölbung	$\Delta\phi \propto \rho^2$	$\Delta\phi \propto (\omega - \omega_0)^2$
Verzerrung	$\Delta\phi \propto \rho^1$	$\Delta\phi \propto (\omega - \omega_0)^1$

Die Tabelle zeigt, daß für diesen Fall eine sphärische Aberration Anlaß für eine zusätzliche Phase vierter Ordnung, Koma Anlaß für eine Phase dritter Ordnung und Astigmatismus zusammen mit der Bildfeldwölbung Anlaß zu Phasengliedern zweiter Ordnung gibt. Verzerrung ist ein Effekt erster Ordnung und trägt nur zur zusätzlichen vorübergehenden Verzögerung des Pulses aber nicht zum Pulsverbreitern bei. Aus der praktischen Sicht ist die Aberrationsregelung nur der Phasen vierter und dritter Ordnung wichtig, weil die Phase zweiter Ordnung der rekomprimierten Pulse einfach eingestellt werden kann, indem die Länge des Kompressors (oder des Dehners) eingestellt wird.

Es sollte bemerkt werden, daß, wenn ein räumlich chirp-modulierter Strahl nicht linear chirp-moduliert wird, dann auch Glieder höherer Ordnung auftreten werden. Beispielsweise würden durch Quadratisch-Machen der räumlichen Chirp-Modulation die Phasenkorrekturglieder, die jeder der Hauptaberrationen entsprechen, ihre Ordnung um eins erhöhen. Dann wäre die Phasenkorrektur der verfügbaren höchsten Ordnung fünfter Ordnung. Bei den Beugungsgitteranordnungen ist die nicht lineare räumliche Chirp-Modulation viel kleiner als die lineare und ihre Wirkung kann vernachlässigt werden. Daher ist es in der Praxis am einfachsten, die Phasenregelung bis zum Glied vierter Ordnung zu erhalten. Zum Erhalten von umwandlungslimitierten Pulsen ist dies in den meisten der Fällen ausreichend.

Das durch die Systeme der vorliegenden Erfindung verwendete Teleskop kann in jeder Bauart sein, aber dasjenige, das aus positiven und negativen Linsen (konkave und konvexe Linsen) besteht ist vorzuziehen, das Wellenfrontverzerrungen mit entgegengesetzten Vorzeichen ergibt. Ein Beispiel ist ein in Fig. 3 gezeigtes Galilei-Teleskop. Beim Teleskop mit konkaven und konvexen Linsen kann die sich ergebende Aberration so gestaltet sein, daß sie entweder einen positiven oder negativen  $\Delta\Phi$ -Wert ergibt. Der Betrag der Phasenverzerrung durch jede Linse steigt mit der Strahlgröße (oder mit kleineren Blendenzahlen für die Randstrahlen). Koma, das eine Phasenkorrektur dritter Ordnung ergibt, ist nur vorhanden, wenn der Strahl unter einem Winkel eintritt (Fortpflanzung außerhalb der Achse). Durch Drehen des Teleskops bezüglich des eingehenden kollimierten Strahls (in derselben Ebene wie die räumliche Chirp-Modulation) kann die Phasenkorrektur dritter Ordnung so gewählt werden, daß sie positiv, null oder negativ ist. Eine sphärische Aberration ist nicht davon abhängig, ob der Strahl auf der Achse liegt oder dazu versetzt ist. Das einzige Verfahren der Regelung der Phase vierter Ordnung liegt in der Regelung der Größe des räumlich chirp-modulierten Strahls durch Auswahl der geeigneten Kombination von konkaven und konvexen Linsen. Diese Regelung ist aufgrund der Abhängigkeit vierter Ordnung der sphärischen Verzerrung von der Strahlgröße sehr wirkungsvoll.

Für ein Linsensystem wurde eine chromatische Aberration auch bei der Gestaltung des Systems mit berücksichtigt. Die chromatische Aberration trägt zur Phasenverzerrung dritter Ordnung eines ultrakurzen Pulses bei und ist von der Strahlgröße nicht abhängig. Die Ergebnisse der Strahlverfolgung durch die Erfinder zeigen jedoch, daß typischerweise diese zusätzliche Phase dritter Ordnung aufgrund der chromatischen Aberration im Vergleich zum Betrag der durch Koma hervorgerufenen Phase dritter Ordnung in einem Experimentalsystem gemäß der Erfindung vernachlässigbar ist und einfach kompensiert werden kann.

Daher ist es möglich, das System mit dem erforderlichen Betrag und Vorzeichen der Phasenverzerrung für jede der Ordnungen durch Auswahl von geeigneten Linsen, des Vergrößerungsfaktors, des Fortpflanzungswinkels durch das Teleskop, der Größe des räumlich chirp-modulierten Strahls und des Profil der räumlichen Chirp-Modulation zu gestalten. Wenn große Beträge der Phasenverzerrung erhalten werden müssen, können einige Teleskope kaskadiert werden. Ein Kaskadieren von einigen Teleskopen ermöglicht es, den räumlich chirp-modulierten Strahl zu vergrößern und die Wirkung der Aberrationen zu steigern. Gleichwertig dazu können die Brennweiten der Linsen verringert werden, um die Aberrationen zu steigern. Beispielsweise sind in



Fig. 4(a) zwei Teleskope 14 und 24 kaskadiert, so daß der Strahl aufgeweitet wird und die Glieder vierter und fünfter Ordnung (sofern vorhanden) ansteigen. Andererseits sind in Fig. 4(b) Teleskope 34 und 44 in einer Weise kaskadiert, die die Strahlgröße erhält. Die Anordnung der Fig. 4(b) ist insoweit vorteilhaft, als daß sie einfacher auszurichten ist und robuster ist. Es sollte bemerkt werden, daß sich die praktischen Beschränkungen durch die minimale Anzahl (oder Brennweite) aufdrängen, die mit den Linsen erhältlich ist.

Der Betrag der unterschiedlichen GVD-Ordnungen, die durch ein spezielles Aberrationsteleskop hervorgerufen werden, kann unter Verwendung seiner Seidel-Koeffizienten für eine sphärische Aberration A040 und für Koma A031 berechnet werden (M. Born und E. Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press, Oxford, 1975, chps. 5 und 9):

$$|\beta_3| = \frac{|A_{031}|}{(\omega - \omega_0)^3} \cdot 12\pi,$$

$$|\beta_4| = \frac{|A_{030}|}{(\omega - \omega_0)^4} \cdot 48\pi,$$

wobei  $(\omega - \omega_0)$  eine Frequenzspreizung über den Radius des Strahls ist.

Unterschiedliche Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung, bei denen Teleskope in die Pulsdehn- und Komprimieranordnungen eingebaut sind, sind in den Fig. 5(a)–5(e) gezeigt. Teleskope können mit Beugungsgittern, Prismen oder anderen möglichen Elementen verwendet werden, die räumlich chirp-modulierte Strahlen für ultrakurze optische Pulse erzeugen. Es ist zu bemerken, daß das Beugungselement entweder reflektierend (Reflexionsbeugungsgitter, -spiegel usw.) oder durchlässig (Transmissionsgitter, usw.) sein kann. Außerdem kann auch ein transmissionsdispersives Element (wie beispielsweise ein Prisma) verwendet werden. Fig. 5(a) zeigt ein beispielhaftes Ausführungsbeispiel, wobei das Teleskop 510 zwischen einen Beugungsgitterkompressor 500 und einen Reflektor 520 eingefügt ist. In Fig. 5(a) weist der Kompressor 500 eine Reflexionsbeugungsgitteranordnung mit negativer Dispersion auf. Andererseits wird das Teleskop 510b in Fig. 5(b) mit einem Beugungsgitterkompressor 500b mit positiver Dispersion verwendet. Das Teleskop ist zwischen ein Gitter 515 und einen Reflektor 520b eingefügt. Eine Anordnung mit null Dispersion ist in Fig. 5(c) verschaubildlicht. Für die in der Fig. 5(c) verschaubildlichte Konfiguration sollten entweder die Teleskoplinse 511, 512 oder die Kollimationslinse 513 zylindrisch sein, weil der Strahl nach den Beugungsgittern nur in einer Ebene der Beugung divergiert und in der senkrechten Ebene kollimiert wird.

Fig. 5(d) zeigt, daß gleichwertige Konfigurationen mit Transmissionsbeugungsgittern erzielt werden können. Ein Vorteil der Anordnungen mit Transmissionsgittern liegt darin, daß sie kompakter als die Reflexionsgitteranordnungen sind. In dem speziellen, in Fig. 5(d) gezeigten Beispiel ist das Teleskop 510d zwischen das Transmissionsbeugungsgitter 516d und den Reflektor 520d eingefügt. Diese Anordnung kann gleichwertig zu der in Fig. 5(a) gezeigten gemacht werden. Das Transmissionsbeugungsgitter kann auch verwendet werden, um Anordnungen vorzusehen, die gleichwertig zu denjenigen sind, die in den Fig. 5(b) und 5(c) sind.

Fig. 5(e) zeigt ein Beispiel, bei dem Prismen als dispersive Elemente verwendet werden. In dem speziellen gezeigten Ausführungsbeispiel könnte die räumliche Chirp-Modulation nicht linear sein, wodurch eine Phasenregelung mit einer höheren Ordnung als der vierten Ordnung ermöglicht wird. In einer ähnlichen Weise wie bei den Beispielen der Fig. 5(a) und (d) ist bei Fig. 5(e) das Teleskop 510(e) zwischen das Prisma 516e und den Reflektor 520e eingefügt. Natürlich sind andere Anordnungen offensichtlich für den Fachmann.

Während in den Ausführungsbeispielen der Fig. 5(a)–(e) Linsen verwendet werden, können gleichwertige Systeme gestaltet werden, indem die Linsen durch sphärische Spiegel ersetzt werden. Zusätzlich kann die sphärische Optik auch durch asphärische Komponenten ersetzt werden, die die Beträge der Haupt-Seidelaberrationen und folglich die Größen der Phasenordnungen verändern. Dies gibt eine zusätzliche Flexibilität für unterschiedliche Gestaltungen.

Die Vorteile der Verwendung von Konfigurationen zur Dispersionsregelung, die durch die Erfindung vorgeschlagen sind, sind durch die beispielhaften CPA-Anordnungen zu erkennen, die in den Fig. 6(a)–6(h) gezeigt sind. Erfindungsgemäß ermöglichen Systeme, die irgendwelche willkürlichen Beträge bei der Phasenverteilung der zweiten, dritten und vierten Ordnung ergeben, eine Kombination von unterschiedlichen Bauarten der Dehner-/Kompressorvorrichtungen und eine Kompensation für eine hoch nicht lineare Frequenz-Chirp-Modulation (beispielsweise einer Laserdiode oder von selbstphasen-verbreiterten Pulsen). Im Gegensatz dazu ergeben herkömmliche Beugungsgittervorrichtungen ein festes Verhältnis zwischen unterschiedlichen Dispersionsordnungen und beschränken mögliche Anordnungen auf ein Paar Dehner/Kompressoren in Martinez-Treacy-Bauweise mit übereinstimmender Dispersion. Die Fig. 6(a)–(e) demonstrieren, daß die Kompaktheit des CPA-Systems wesentlich verbessert werden kann, indem kompakte Fasern und Fasergitterpulsdehner oder einstellbare Laserdioden als Quellen der chirp-modulierten optischen Pulse am Eingang eines CPAs verwendet werden. Herkömmliche Kompressoren werden verwendet, um den Puls nach der Verstärkungsstufe zu komprimieren. Eine Kompatibilität zwischen den kompakten Vorrichtungen (Faserdehner und Laserdioden) und den Kompressoren in Martinez-Treacy-Bauweise wird erfindungsgemäß erreicht, indem das Teleskop verwendet wird.

Beispielsweise wird in der Konfiguration der Fig. 6(a) ein chirp-moduliertes Fasergitter 600 als ein Dehner verwendet. Der gedehnte Puls wird dann auf einen optischen Verstärker 630a aufgebracht und danach durch einen durchlässigen Spiegel 635a in den Kompressor 605a hindurchtreten. Der in diesem speziellen Beispiel gezeigte Kompressor verwendet zwei Reflexionsbeugungsgitter 615a und 616a. Wie vorstehend bezüglich der



Fig. 5(a)—5(e) bemerkt wurde, können jedoch auch andere Anordnungen und optische Elemente verwendet werden. Zur Kompensierung der starken GVD-Fehldeckung zwischen dem Dehner und dem Kompressor ist ein Teleskop 610a in die Bahn zwischen dem Gitter 616a und dem Reflektor 620a eingeführt, wie es durch die vorliegende Erfindung vorgesehen wird.

Das beispielhafte System der Fig. 6(a) ist gegenüber den herkömmlichen Systemen vorteilhaft, da die Größe des Fasergitterdehners 600 (Länge  $\approx 10$  cm) für Nanosekundengedehnte Pulse im Vergleich zu typischen Dehnern in Martinez-Bauweise (1—2 m Länge) vernachlässigbar ist. Dadurch ist die Gesamtabmessung des Systems durch die vorliegende Erfindung verringert. Eine ähnliche Verbesserung kann durch Verwendung einer Einzelmodusfaser zum Pulsdehnen erreicht werden. Die beispielhafte Konfiguration, die in Fig. 6(b) gezeigt ist, verwendet eine Positivdispersionsfaser 600b in der Transmissionsleitung. Bezüglich der anderen Merkmale ist dieses grundlegende beispielhafte System ähnlich dem in Fig. 6(a) gezeigten System. Die in Fig. 6(c) verschau-  
bildlichte Konfiguration ist ähnlich der der Fig. 6(b), mit der Ausnahme, daß ein Faradaydrehspiegel 601c am Ende des Faserdehners 600c angeordnet ist, um einen Hin- und Rücklauf in dem Faserdehner 600c zu verwirklichen und die Effekte zu beseitigen, die durch eine schwache Faserdoppelbrechung hervorgerufen werden.

Fig. 6(d) zeigt ein Beispiel, bei dem eine abstimmbare Laserdiode 640d als eine Quelle verwendet wird. Typische Beschränkungen der Dauer des komprimierten Pulses, die mit einer derartigen Diode erzielt werden, bestehen aufgrund großer Chirp-Modulationskomponenten mit höherer Ordnung, die typischerweise größer als diejenigen sind, die mit einer Standardkonfiguration mit Beugungsgittern kompensiert werden kann (A. Galvan-  
auskas, M. E. Fermann, P. Blixt, J. A. Tellefsen, D. Harter, "Hybrid diode-laser fiber-amplifier source of high-ener-  
gy ultrashort pulses," Opt. Lett. 19, 1043 (1994)). Ein experimentelles System mit einer Kompressorgestaltung gemäß der vorliegenden Erfindung wurde gezeigt, um diese große Chirp-Modulation höherer Ordnung zu kompensieren. Der grundlegende Aufbau des Systems, das in Fig. 6(d) gezeigt ist, ist ähnlich dem der Fig. 6(a)—6(c) mit der Ausnahme, daß es die Diode 640d als Quelle verwendet.

Die Fig. 6(e) zeigt eine beispielhafte Hybridkonfiguration. Die Pulse werden mit einem Fasergitter 600e gedehnt und auf einen optischen Verstärker 630e aufgebracht. Danach werden die verstärkten Pulse teilweise durch ein Fasergitter 650e komprimiert. Die abschließende Kompression wird mit einem massiven Kompressor 605e erzielt, der entweder Beugungsgitter oder Prismen verwenden kann, wie bezüglich der Fig. 5(a)—5(e) bemerkt wurde. Eine Dispersionsregelung unter Verwendung des erfindungsgemäßen Teleskops 610e ist in dem massiven Kompressor erforderlich, um sowohl jede mögliche Dispersionsfehlddeckung zwischen den zwei Faser-  
gittern als auch die Fehldeckung zwischen dem Fasergitter und dem massiven Kompressor zu kompensieren.

Der Vorteil dieser Anordnung ist ihre extrem geringe Abmessung bei hohen erreichbaren Pulsenergien. Die Abmessung des massiven Kompressors richtet sich nach der Dauer der Eingangspulse und die beiden Fasergit-  
ter können gewählt werden, um nur Pulse mit einer Dauer von einigen Pikosekunden vor der abschließenden Kompression zu ergeben. Dadurch, daß es ermöglicht wird, daß die Pulse keine hohen Spitzenleistungen an der Ausgangsöffnung des Fasergitters erreichen, können höhere Pulsenergien ohne Pulsverzerrungen durch nicht  
lineare Effekte in der Faser erreicht werden.

Die Fig. 6(f) zeigt ein beispielhaftes Ausführungsbeispiel zur Kompression von optischen Pulsen, die spektral durch Selbstphasenmodulation in einer optischen Faser verbreitert sind. Die allgemeine Technik wird oft verwendet, um anfängliche Pulsdauern wesentlich zu verkürzen. Unter vielen Bedingungen ergibt jedoch die Selbstphasenmodulation eine nicht lineare Frequenz-Chirp-Modulation, die in einem herkömmlichen Kompres-  
sor schwierig zu kompensieren ist. Wie in Fig. 6(f) gezeigt ist, wird der sich ausbreitende Puls in der Selbstpha-  
senmodulationsfaser 600f verbreitert. Der verbreiterte Puls wird daher auf einen Kompressor 605f aufgebracht, der ein Teleskop 610f umfaßt. Dadurch ermöglicht das erfindungsgemäße System eine Korrektur der willkürli-  
chen Nichtlinearitäten, die durch die Selbstphasenmodulation erzeugt werden.

Die Fig. 6(g) zeigt eine beispielhafte Aberrationsregelungsanordnung, die zusätzlich zu der herkömmlichen nicht hybriden Konfiguration Dehner/Kompressor verwendet wird. Bei einer herkömmlichen Martinez-/Trea-  
cy-CPA-Konfiguration besteht eine Schwierigkeit beim In-Übereinstimmung-Bringen der Dispersionsordnun-  
gen aus der Beseitigung des Stoßes der Linsenaberrationen des Dehners, was normalerweise die Dauer der rekomprimierten Pulse beschränkt. Die zusätzliche, durch Verzerrungen hervorgerufene Aberration ist insbe-  
sondere nachteilig bei längeren Wellenlängen. Eine auf Strahlverfolgung beruhende Analyse ergibt, daß selbst mit demselben Betrag der Wellenfrontaberrationen die Pulsphasenverzerrungen in einem derartigen Dehner bei  
—1550 nm ungefähr um eine Größenordnung größer im Vergleich mit einem 800 nm-Wellenlängenband ist. Unter Verwendung des Verfahrens der vorliegenden Erfindung kann diese Phasenverzerrung beseitigt werden.

Ein zusätzlicher Vorteil des Ausführungsbeispiels, das in Fig. 6(g) gezeigt ist, bezieht sich auf die durch die Verstärkungsstufe hervorgerufene Dispersion. Die Dispersion in dem Verstärkermaterial und den -komponen-  
ten erfordert nämlich eine leichte Fehldeckung der Dehner- und Kompressorgittertrennung. Dies ermöglicht ein Kompensation von zusätzlicher linearer GVD. Diese Fehldeckungen sind jedoch alle GVD höherer Ordnung. Für eine kleine Fehldeckung in einer herkömmlichen Anordnung ist es möglich, GVD-Glieder höherer Ordnung zu kompensieren, indem die Gitter mit gewissen Fehldeckungswinkeln und gewissen Abständen gesetzt werden. Außer daß dieses Verfahren sehr kompliziert und in der Größe beschränkt ist, wie zuvor erwähnt ist, führt dieses  
Verfahren gewöhnlich zu einem Betrieb des Beugungsgitters weit entfernt von dem Littrow-Winkel. Wie bekannt ist, ist die Beugungswirksamkeit am Littrow-Winkel am höchsten und vorzuziehen, um Pulsenergiever-  
luste in dem Kompressor zu minimieren. Unter Verwendung des erfindungsgemäßen Teleskops ist jedoch eine bessere Regelung der höheren Glieder der GVD vorgesehen und die Wirksamkeit kann verbessert werden.

Wie in Fig. 6(g) gezeigt ist, wird der Puls zunächst in einem Dehner 600g in Martinez-Bauweise gedehnt, wobei ein Teleskop 610g zwischen das Beugungsgitter 616g und den Reflektor 620g eingefügt ist. Der gedehnte Puls wird durch den Verstärker 630g verstärkt und dann in einem herkömmlichen Kompressor 605g in Treacy-Bauweise komprimiert. Durch die Verwendung des durch die vorliegende Erfindung offenbarten Teleskops 610g

kann eine Phasenverzerrung aufgrund von Linsenaberrationen des Dehners beseitigt werden.

Die in den Fig. 5(c), (d) und (e) gezeigten Konfigurationen können derart angeordnet werden, daß sie eine sehr geringe lineare GVD haben. Dies ist beispielsweise in dem System nützlich, bei dem die Anordnung zur Kompensation nicht linearer Phasen zwischen unterschiedliche Verstärkungsstufen eingefügt ist, um zusätzliche Komponenten in der Anordnung zur abschließenden Kompression zu vermeiden. Ein Beispiel eines derartigen Systems ist in Fig. 6(h) herausgestellt, wobei der Puls in einem Fasergitterdehner 600h gedehnt wird, durch einen optionalen optischen Verstärker 630h verstärkt wird, in dem nicht linearen GVD-Kompensator 670h kompensiert wird, weiter durch einen optischen Verstärker 633h verstärkt wird und schließlich in dem Kompressor 605h komprimiert wird.

Idealerweise sollte eine derartige zusätzliche Kompensationsanordnung eine vernachlässigbare lineare GVD und eine große nicht lineare GVD haben. Eine große lineare GVD muß nur im abschließenden Kompressor 605h kompensiert werden, der bei diesem speziellen Beispiel ein herkömmlicher Kompressor in Treacy-Bauweise ist. Ein Vorteil dieser Konfiguration liegt darin, daß die Strahlqualität in dem abschließenden Kompressor 605h nicht durch den Betrag der Aberrationen beeinflusst wird, die zur nicht linearen GVD-Kompensation 670h eingesetzt werden, vorausgesetzt, daß der Ausgangsmodus des Einzelmodusfaserverstärkers unabhängig von den Eingangsbedingungen ist.

Die Bemerkung ist nützlich, daß eine Kompensation der Phase vierter Ordnung durch die sphärische Aberration ein einzigartiges Merkmal der Erfindung ist, im Vergleich mit den herkömmlichen Beugungsgitter- oder Prismapulskompressoren, bei denen eine Regelung der vierten Ordnung sehr schwierig zu erzielen ist. Die Kompensation der vierten Ordnung ist wesentlich für die Erzielung von rekomprimierten Pulsen, die kürzer als 100 fs sind. Dadurch macht es die vorliegende Erfindung möglich, robuste Systeme zu bauen, wobei Pulse mit 100 fs oder kürzerer Dauer eingesetzt werden.

Ein anderes Verfahren zur Kompensation von großen GVD-Fehldeckungen ist in Fig. 7 gezeigt. Eine Bragg-Struktur (beispielsweise ein Fasergitter) kann derart gestaltet sein, daß sie einen Gitterabstand hat, der sich nicht linear entlang der Faser verändert (chirp-moduliertes Gitter). Gegenwärtig werden chirp-modulierte Faser-Bragg-Gitter mit einem Abstand, der sich linear entlang der Faser verändert, zum Dehnen und Rekomprimieren von Pulsen im Femtosekunden- und Pikosekunden-Bereich in einem CPA-System verwendet (siehe US 5 499 134). Wie jedoch zuvor bemerkt wurde, können gegenwärtig linear chirp-modulierte Fasergitter als Dehner nur in Systemen verwendet werden, bei denen Fasergitter auch als die Kompressoren verwendet werden. Andernfalls, wenn massive Kompressoren verwendet werden, müssen Mittel zur Berücksichtigung der GVD – wie beispielsweise das erfindungsgemäße Teleskop – eingeschlossen sein.

Gemäß einem anderen Gesichtspunkt der Erfindung wird ein kompakter Faserdehner zusammen mit einem massiven Kompressor verwendet, wobei eine nicht lineare Phasenkorrektur erzielt wird, indem ein nicht linear chirp-moduliertes Faser-Bragg-Gitter verwendet wird. Gemäß diesem Gesichtspunkt der Erfindung ist die Gitterperiode als eine nicht lineare Funktion von den Koordinaten entlang der Faser gestaltet, so daß die ergebende Dispersion auch entsprechende nicht lineare Glieder haben wird. Daher sollte zur Kompensation von Phasen zweiter, dritter und vierter Ordnung die Gitterperiode eine nicht lineare Funktion der Längskoordinaten sein, die jeweils Chirpkomponenten erster, zweiter, dritter usw. Ordnung haben. Gitter mit einer nicht linearen Periode können beispielsweise in eine optische Faser geschrieben werden, indem eine nicht linear chirp-modulierte Phasenmaske verwendet wird (siehe R. Kashyap et al. Novel Method of Producing All Fibre Photoconducted Chirped Gratings, Electronics Letters, 9th June 1994, Vol. 30, No. 12, pp. 996–997), oder indem die Technik der unähnlichen Wellenfronten verwendet wird (siehe K. Sugden, Dissimilar Wavefront Technique for Linear and Quadratic Chirps, Conference Proceedings: Photosensitivity and Quadratic Nonlinearity in Glass Waveguides; Technical Digest Series Vol. 22, Paper SUB 12, 1995). Die Phasenmaskenschreibtechnik ist vorzuziehen, da die Maske einfach hergestellt werden kann, um die erforderliche nicht lineare Chirp-Modulation in der Längskoordinate zu haben.

Bei einem Beispiel setzt sich das CPA-System aus einem nicht linear chirp-modulierten Bragg-Gitterdehner (nicht gezeigt) und einem herkömmlichen Beugungsgitterpulskompressor 705 (siehe Fig. 7) zusammen. Die nicht lineare Chirp-Modulation des Bragg-Gitters ist derart gestaltet, daß die Dispersionsordnungen des herkömmlichen Kompressors 705 in Übereinstimmung gebracht werden. Insbesondere sind die GVD-Glieder für einen typischen Beugungsgitterkompressor  $IP2 \approx 50 \times 10^{-24} s^2$ ,  $| \beta_3 | \approx 1 \times 10^{-36} s^3$ ,  $| \beta_4 | \approx 50 \times 10^{-51} s^4$ , die durch die entsprechenden Dispersionsordnungen des Bragg-Gitters in Übereinstimmung zu bringen sind. Es sollte bemerkt werden, daß die Glieder mit einer höheren als der vierten Ordnung nicht für die Pulsdauer der rekomprimierten Pulse wichtig sind, die länger als  $\approx 100$  fs sind.

Dieser Gesichtspunkt der Erfindung verwendet ein einziges nicht linear chirp-modulierte Fasergitter, so daß sich praktische Beschränkungen durch die Präzision aufräumen können, die durch die spezielle verwendete Herstelltechnik erzielbar ist. Für Nano-Sekunden-gedehnte Pulse sollte die Gitterlänge ungefähr 10 cm sein. Für eine typische Pulsbandbreite von ungefähr 15 nm bei 1550 nm als mittlerer Wellenlänge erfordert ein linear chirp-moduliertes Gitter ungefähr 1% Gitterabstandsschwankungen entlang des Gitters. Zur Erzielung des obigen Wertes von  $| \beta_3 |$  und  $| \beta_4 |$  mit einer gegebenen Bandbreite und einem derart langen Gitter wäre die zusätzliche nicht lineare Abstandsschwankung 10 bis 100 mal kleiner als die 1% Abstandsschwankung des linearen Gitters. Dies würde die höchste Präzision erfordern, die mit der gegenwärtig verfügbaren Phasenmaskentechnologie erzielbar ist.

Entsprechend ist es für diesen Gesichtspunkt der Erfindung vorzuziehen, eine Fasergitteranordnung zu verwenden, die in Fig. 7 gezeigt ist. Wie in Fig. 7 gezeigt ist, werden zwei Fasergitter verwendet. Das linear chirp-modulierte Gitter 715 wird als ein herkömmlicher Fasergitterdehner verwendet, während das nicht linear chirp-modulierte Gitter 710 die erforderliche nicht lineare Phasenkorrektur vorsieht. In diesem speziellen Beispiel hat das Gitter 715 ungefähr 10 cm Länge und sieht eine lineare GVD vor, während das Gitter 710

ungefähr 10 bis 100 mal kürzer ist und eine nicht lineare Phasenkorrektur dritter und vierter Ordnung vorsieht.

Für ein N-mal kürzeres Gitter und eine unveränderliche Pulsbandbreite steigt die Größe der erforderlichen nicht linearen Abstandsabwandlung um denselben Faktor N an. Daher können mit den 1 mm bis 1 cm kurzen Gittern die vorstehend genannten erforderlichen Werte von  $|\beta_3|$  und  $|\beta_4|$  erreicht werden. Zusätzliche Pulsenergieverluste aufgrund der seriellen Verbindung der Gitter 710 und 715 sind bei der Dehnungsstufe nicht wesentlich, weil sie einfach mit einer zusätzlichen Verstärkung des optischen Verstärkers kompensiert werden können.

## 2. Hybridfaser- und Festkörperverstärker

Wenn unterschiedliche Arten von Verstärkungsmaterial für die Keimquelle und den Verstärker verwendet werden, muß spezielle Sorge dafür getragen werden, daß die Spektren des eingespeisten Pulses und der Verstärkerertrag miteinander übereinstimmen. Es ist allgemein bekannt, daß eine wirksame Frequenzumwandlung einfacher mit kurzen Pulsen erreicht werden kann, weil die Umwandlungswirksamkeit mit der Pulsspitzenleistung ansteigt. Die Verwendung von ultrakurzen Pulsen zur Frequenzumwandlung beschränkt mögliche Einspeisungsschemata auf das eine, das in Fig. 1(a) gezeigt ist, bei dem ein Oszillatorausgang frequenzverdoppelt werden kann, um mit dem Verstärkerspektrum übereinzustimmen.

Es ist eine der Aufgaben der vorliegenden Erfindung, eine Frequenzumwandlung von langen gedehnten optischen Pulsen als Mittel zum In-Übereinstimmung-Bringen der Spektren eines Keims und eines Verstärkers zu verwenden, so wie beispielsweise in Fig. 1(b) gezeigt ist. Dies wird praktisch möglich aufgrund der Pulsenergien von 100 nJ–100 pJ, die gegenwärtig durch eine Faserverstärkerquelle erzielbar sind (M. E. Fermann, A. Galvanauskas, D. Harter, "All-fiber source of 100-nJ subpicosecond pulses, Appl. Phys. Lett. 64, 1315 (1994); A. Galvanauskas, M. E. Fermann, P. Blixt, J. A. Tellefsen, D. Harter, "Hybrid diode-laser fiber-amplifier source of high-energy ultrashort pulses," Opt. Lett. 19, 1043 (1994)), und da diese neuartigen Materialien und Techniken verfügbar sind, die hohe optische Nicht-Linearitäten zulassen (M. M. Fejer, G. A. Magel, D. H. Jundt, und R. L. Byer, "Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation Tuning and Tolerances," IEEE J. Quant. Electron. QE-28, 2631 (1992)). Wie bei den detaillierten Ausführungsbeispielen beschrieben ist haben die Erfinder Umwandlungswirkungsgrade von gedehnten Pulsen demonstriert, die größer als 10% sind. Das ist mehr als ausreichend für eine praktische Anwendung in dem Schema der Fig. 1 (b). Dies hat auch in etwa denselben Umwandlungswirkungsgrad im Vergleich zu einer mehr herkömmlichen Methode, bei der rekompriert wird, dann die Frequenz verdoppelt wird und dann der zweite harmonische Puls wieder gedehnt wird, wobei der abschließende Wirkungsgrad von ungefähr 10% das Produkt der Wirkungsgrade eines Kompressors ( $\approx 50\%$ ), eines Verdopplers ( $< 50\%$ ) und eines Dehners ( $\approx 50\%$ ) ist. Offensichtlich hat die traditionelle Methode einen großen Nachteil. Auch die Verwendung des Einspeisungsschemas der Fig. 1(b) gibt eine Vielzahl von wesentlichen Vorteilen im Vergleich mit dem Schema der Fig. 1(a).

Der direkte Vorteil ist die wesentliche Verringerung der Abmessung, der Anstieg der Robustheit und eine beträchtliche Kosteneinsparung des Gesamtsystems. Erstens liegt das an dem Faserverstärkungssystem, das alle anfänglichen Stufen des Festkörpersystems ersetzt. Keine zusätzlichen Dehner oder Kompressoren sind erforderlich. Die Keimquelle belegt gerade einen Bruchteil des Raums der beispielsweise für einen traditionellen Argonlaser erforderlich ist, um die Systeme zu pumpen, die vollständig Festkörper sind. Eine derartige kompakte Keimquelle ist auch attraktiv zur Verwendung am vorderen Ende jedes CPA-Systems unabhängig von der Anwendung. Zweitens kann aufgrund der Keimenergien im Mikrojoulebereich, die bei kurzen Wellenlängen verfügbar sind, die Größe des abschließenden Festkörperhochenergieverstärkers beträchtlich verringert werden. Die Länge des regenerativen Verstärkers wird durch die Geschwindigkeit einer Pockels-Zelle bestimmt. Anstiegs- und Abfallzeiten für das geschaltete Fenster müssen kürzer als die Pulsrundlaufzeit in der Verstärkervkavität sein. Das schnellste Umschalten der Pockels-Zellen in "AN" und "AUS"-Zustände kann mit photokonduktiven Hochspannungsschaltern erreicht werden, die mit optischen Pulsen getriggert werden.

Aufgrund von Materialeigenschaften müssen gegenwärtig verfügbare Schalter mit optischen Pulsen kurzer Wellenlänge (beispielsweise 800 nm) getriggert werden. Anstiegszeiten werden für höhere Schaltimpulsenergien kürzer. Frequenzverdoppelte gedehnte optische Pulse sind zum schnellen Schalten ideal. Typische gedehnte Pulse haben Anstiegszeiten im Bereich von 100–400 ps. Für eine Anstiegszeit von  $\approx 400$  ps sind sowohl beim "AN"- als auch beim "AUS"-Schalten  $\approx 1$   $\mu$ J bei  $\approx 800$  nm erforderlich (Siehe US 5 384 798). Mit dieser Geschwindigkeit kann die Länge des regenerativen Verstärkers kürzer als  $\approx 30$  cm sein. Es ist zumindest eine 6-fache Verkleinerung im Vergleich zu typischen Pulseinspeisungssystemen im Nanojoulebereich. Das schnelle Schalten des regenerativen Verstärkers gibt zusätzliche Vorteile. Ein kürzeres Zeitfenster gibt sauberere Ausgänge aufgrund weniger verstärkter spontaner Emission. In einer kürzeren Kavität können thermische Linseneffekte besser geregelt werden als in einer längeren Kavität. Dies trägt zur insgesamt verbesserten Robustheit und zu verringerten Ausrichtungstoleranzen eines kurzen regenerativen Festkörperverstärkers bei.

Eine Schema zur Verwendung frequenzverdoppelter gedehnter Pulse zum schnellen Schalten regenerativer Verstärker ist in Fig. 8 gezeigt. Bei diesem Beispiel wird ein frequenzverdoppelter Puls in drei Teile aufgeteilt, wobei Teilreflexionsspiegel verwendet werden, wobei diese Pulse zur Pulseinspeisung und als "AN" und "AUS"-Schalter verwendet werden. Ein alternativer Weg wäre die Verwendung des nicht konvertierten Teils des gedehnten Grundteils und dessen Konversion in die zweite Harmonische mit einem separaten Kristall (oder separaten Kristallen für jeden der beiden Schalter), um optische Pulse für die photokonduktiven Schalter zu erzeugen. Die gesamte zweite harmonische Leistung nach dem ersten Kristall würde zur Einspeisung verwendet werden. Geeignete Zeitverzögerungen müssen zwischen den Pulsen in beiden Fällen eingeführt werden, um sicherzustellen, daß der optische Puls innerhalb des Pockels-Zellenzeitfensters eingespeist wird.

Die Möglichkeit der Anregung eines Verstärkers mit einem zweiten harmonischen Puls im Mikrojoulebereich im Gegensatz zu den Pikojoule oder Nanojoule-Pulsen, die typischerweise bei bestehenden Einspeisungssystemen

men verwendet werden, verbessert drastisch den Kontrast des Systems. Erstens extrahiert der eingespeiste Puls im Mikrojoulebereich die in dem Verstärker gespeicherte Energie wesentlich wirkungsvoller, wodurch praktisch ein ASE-Hintergrund eliminiert wird. Zweitens wird erwartet, daß die Wiedergabetreue der rekomprimierten Pulse als ein Ergebnis der Frequenzverdoppelung der gedehnten optischen Pulse ansteigt. Typischerweise haben die anfänglichen Pulse von optischen modenverkoppelten Oszillatoren einige temporäre Ausläufer mit geringer Intensität und eine Säule, die spektral in den Ausläufern des Spektrums angeordnet sind. Wenn nach dem Dehnen die Pulsdauer viel größer als ihre Bandbreitengrenze ist, erwirbt die Form des gedehnten Pulses die Form seiner Spektralform. Folglich "reinigt" das Frequenzverdoppeln (dessen Wirksamkeit proportional zum Quadrat der Intensität ist) dieser gedehnten Pulse wirksam diese Ausläufer geringer Intensität sowohl spektral als auch temporal. Eine nachfolgende Verstärkung der "reinen" frequenzverdoppelten Pulse führt zu einer viel kleineren Säule der rekomprimierten Pulse.

Außerdem dient das Frequenzverdoppeln der gedehnten Pulse als eine weiche Öffnung, die das spektrale Profil glättet und es ermöglicht, die Energiemenge in den temporären Ausläufern der rekomprimierten Pulse weiter zu verringern. Das ist wichtig für kommerziell verfügbare laserplasmabetriebene Röntgenquellen und andere Laseranwendungen hoher Intensität, bei denen Intensitäten mit Werten zwischen  $10^{19}$ – $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> durch Fokussieren verstärkter Pulse erhalten werden und ein Kontrast bis zu  $10^{10}$  notwendig ist, um die Säule daran zu hindern, das Ziel zu ionisieren. Bis heute wurde diese Stärke eines Kontrasts nicht mit Einspeisungsquellen geringer Energie erzielt.

Ein anderer Vorteil daraus, daß Mikrojoule- anstelle Nanojoule-Pulsen am Eingang eines regenerativen Verstärkers vorliegen, liegt darin, daß es möglich gemacht wird, das verstärkte Pulsspektrum zu regeln. Erstens wird eine Ertragsschmälerungswirkung bei Hochenergieverstärkern aufgrund des viel kleineren Ertrags stark verringert, der erforderlich ist, um hohe Energien zu erreichen. Zweitens ermöglicht eine hohe Energie, die zur Einspeisung zur Verfügung steht, ein spektrales Vorformen zu verwenden, um die Ertragsschmälerungswirkung in den letzten Verstärkungsstufen vorzukompensieren. Drittens wird eine hohe Energie für unterschiedliche Spektralverbreiterungstechniken (beispielsweise unter Verwendung von Selbstphasenmodulation) gebraucht, um die Bandbreite der Pulse vor der Einspeisung zu vergrößern, so daß sehr kurze Pulse nach der Rekompresion erhalten werden.

### 3. Beispielhafte Einrichtung des erfinderischen CPA-Systems

Fig. 10(a) zeigt ein beispielhaftes Ausführungsbeispiel eines hybriden CPA-Systems, das einen Verdopplungskristall verwendet, um die Frequenz der gedehnten Pulse gemäß einem Merkmal der vorliegenden Erfindung zu verdoppeln. Das spezielle beispielhafte Ausführungsbeispiel der Fig. 10(a) weist einen modenverkoppelten Faseroszillator 100 auf, dessen Lichtpulse durch den Faserdehner 110 gedehnt werden, der irgendeine der Faserdehneranordnungen haben kann, die vorstehend beschrieben sind. Die gedehnten Pulse werden dann in dem Dreistufenfaserverstärker 120 verstärkt.

Gemäß dem vorstehend beschriebenen Merkmal der vorliegenden Erfindung ist ein Verdopplungskristall 130 in die Lichtbahn hinter dem Austritt des Pulses aus dem Verstärker 120 eingefügt. Zusätzlich ist eine aufteilende Optikanordnung 165 gemäß der Fig. 8 eingesetzt, um die verdoppelten Pulse aufzuteilen und die verdoppelten Pulse auf die Synchronisations-Anordnung 160 aufzubringen. Beim Ausführungsbeispiel der Fig. 10(a) ist die Synchronisation 160 so dargestellt, daß sie einen Q-Schalter 170 triggert und daß sie auf den frequenzverdoppelten Puls anspricht.

Es ist jedoch wichtig, herauszustellen, daß, obwohl es zur Zeit vorteilhaft ist, photokonduktive Hochspannungsschalter mit kurzen Wellenlängenpulsen zu triggern, weitere technologische Fortschritte bei der Materialverarbeitung die Herstellung von Schaltern ermöglichen kann, die mit Pulsen geringer Wellenlänge (beispielsweise bei  $1,5\ \mu\text{m}$ ) getriggert werden können. Das würde eine Abwandlung des beispielhaften Ausführungsbeispiels der Fig. 10(a) und 10(b) ermöglichen, um die grundlegende Wellenlänge der Einspeisungsquelle zum Schalten zu verwenden. Dies kann beispielsweise durch Bewegungen der aufteilenden Anordnung 165 in eine Stelle in der Bahn zwischen dem Verstärker 120 und dem Verdopplungskristallen 130 gemacht werden. Alternativ dazu kann die grundlegende Wellenlänge nach der Frequenzumwandlung herausgenommen werden, indem herkömmliche Vorrichtungen wie beispielsweise selbst schaltende Krystalle oder Mach-Zender-Schalter verwendet werden. Während ein Q-geschalteter regenerativer Verstärker 140 gezeigt ist, sollte daher zu verstehen sein, daß der Verstärker 140 eine elektro-optische Schaltanordnung umfassen kann.

Wie in Fig. 10(a) gezeigt ist, wird der andere Teil des aufgeteilten Pulses auf den regenerativen Verstärker 140 aufgebracht. Bei diesem bevorzugten Ausführungsbeispiel ist der regenerative Verstärker 140 ein Alexandrit-Laser und wird durch einen Alexandrit-Pumplaser 145 gepumpt. Wie nachstehend vollständiger erläutert wird, wird der regenerative Verstärker 140 bei ungefähr  $50^\circ\text{C}$  betrieben, während der Alexandrit-Pumplaser bei einer erhöhten Temperatur beispielsweise bei  $300^\circ\text{C}$  betrieben wird.

Der verstärkte Puls wird dann in dem Kompressor 150 rekomprimiert. Der Kompressor 150 kann irgendeine der Anordnungen sein, die vorstehend erläutert wurden und ein Teleskop 155 gemäß der vorliegenden Erfindung umfaßt. Während dieses Ausführungsbeispiel eine spezielle Anordnung der zahlreichen beteiligten Elemente zeigt, sind zahlreiche Abwandlungen und Veränderungen für Fachleute offensichtlich. Beispielsweise kann, wie bemerkt wurde, irgendeine der Dehner-Kompressor-Anordnungen verwendet werden, die vorstehend veranschaulicht sind. In ähnlicher Weise können andere regenerative Verstärker und Pumplaser verwendet werden, wie beispielsweise Erbium dotierte Faserverstärker und Erbium dotierte Pumpfasern. Zusätzlich kann wie vorstehend erwähnt ist, jede beliebige elektro-optische Schaltanordnung verwendet werden. Darüber hinaus kann die herkömmliche Schaltelektronik anstelle der elektro-optischen Anordnung verwendet werden.

Eine derartige Abwandlung ist in Fig. 10(b) gezeigt, wobei der erfindungsgemäße Faserdehner durch die

herkömmliche Martinez-Treacy-Dehner-Kompressoranordnung ersetzt worden ist. Insbesondere ist der Faserdehner 110 der Fig. 10(a) durch einen Dehner 110A in Martinez-Bauweise ersetzt und der Kompressor 150 wurde abgewandelt, um das Teleskop 155 zu beseitigen. Natürlich kann das Teleskop noch in den Kompressor 150 eingefügt sein, um die verbesserte GVD-Kompensation zu erreichen, wie beispielsweise bezüglich Fig. 6(g) bemerkt ist.

Die Verwendung der Verdopplungskristalle zur Verdopplung der Frequenz der gedehnten Pulse gemäß der Erfindung ist unter vielen Gesichtspunkten vorteilhaft. Oberhalb einer Eingangspulsenergie von 100 nJ ist die Erzeugung der zweiten Harmonischen mit einem Umwandlungswirkungsgrad von 10–12% gesättigt, wodurch angedeutet wird, daß eine wesentliche Verbesserung im Vergleich zu den Zehnern an Mikrojoules vorliegt, die erforderlich sind, um die Sättigung mit herkömmlichen Doppelbrechungsphasenübereinstimmungskristallen zu erreichen. Die Frequenzverdopplung von gedehnten anstelle der komprimierten Pulse ist auch vorteilhaft, weil es ein breiteres zweites harmonisches Spektrum und folglich kürzere rekomprimierte Pulse ergibt. Dies folgt aus der Tatsache, daß beim Frequenzverdoppeln der Subpikosekund-Pulse ein temporäres Abwandern zwischen den Grundpuls und den Pulsen der zweiten Harmonischen ein Verengen des erzeugten zweiten harmonischen Spektrums hervorruft. Die gedehnten Pulse sind typischerweise länger als diese Abwanderungsverzögerung und nicht dadurch beeinflusst. Das sich ergebende zweite harmonische Spektrum ist breiter. Das zweite harmonische Spektrum von 300 ps-Pulsen ist in Fig. 11(b) gezeigt. Es ist zweimal breiter (4 nm) als das zweite harmonische Spektrum (1,9 nm), das mit komprimierten Femtosekunden-Pulsen erreicht wird.

## Detaillierte Beschreibung der experimentell demonstrierten Ausführungsbeispiele

### 1. Kompensation der Dispersionsfehldeckung zwischen einem Beugungsgitterdehner und -Kompressor

Die Verwendung von Aberrationen wurde experimentell mit einem CPA-System demonstriert, das ähnlich dem des in Fig. 6(g) gezeigten ist. Es war ein fasergestütztes Mikrojoule-Verstärkungssystem. Anfängliche Pulse wurden mit einem modenverkoppelten Faseroszillator erzeugt, der anfängliche Pulse mit einer Dauer von 175 fs und einer spektralen Bandbreite von  $\approx 24$  nm vorgesehen hat. Diese Pulse wurden in einem Gruppenbeschleunigungsdispersions-Positivdehner in Martinez-Bauart mit Beugungsgitter gedehnt, in einem Zweistufenfaserverstärker bis zur Mikrojouleenergie verstärkt und mit einem negativen GVD-Kompressor in Treacy-Bauweise rekomprimiert. Der Abstand zwischen den Kompressorgittern war 50 cm. Das Martinez-Teleskop in dem Dehner hatte zwei bikonvexe Linsen mit 50 cm Brennweite. Die Gesamtlänge des Dehners war 1,5 m.

Idealerweise sollte ein Dehner in Martinez-Konfiguration mit allen Dispersionsordnungen des Treacy-Kompressors in Übereinstimmung sein (sie sollten gleich aber von entgegengesetztem Vorzeichen sein). In Wirklichkeit verhindern jedoch Aberrationen der Teleskoplinsen das vollständige In-Übereinstimmung-Sein. Wie zuvor bemerkt wurde ist diese Fehldeckung insbesondere bei einer Wellenlänge von 1550 nm groß. In Experimenten haben die Erfinder herausgefunden, daß es aufgrund einer großen Aberrationsverteilung schwierig war, rekomprimierte Pulse zu erhalten, die kürzer als  $\sim 400$  fs sind. Sowohl numerisch (unter Verwendung einer Strahlverfolgung) als auch experimentell (durch Messen der Pulsphase mit der sogenannten STRUT-Technik zweiter Harmonischer) (J.-k Rhee, T. S. Sosnowski, T. B. Norris, J. A. Arns, W. S. Colburn, "Chirped pulse amplification of 85-fs pulses at 250 kHz with third-order dispersion compensation by use of holographic transmission gratings," Opt. Lett. 19, 1550 (1994)) haben die Erfinder bestimmt, daß zusätzliche Dispersionsglieder aufgrund von Aberrationen in einem Standard-Martinez-Dehner waren:  $\beta_3 = 100 \times 10^{-39} \text{s}^3$  und  $\beta_4 = -50 \times 10^{-51} \text{s}^4$ . Derart starke Beträge einer Phasenverzerrung dritter und vierter Ordnung können nicht durch eine gewünschte Fehldeckung zwischen dem Dehner und dem Kompressor kompensiert werden.

Zur Kompensation dieser großen Phasenverteilungen dritter und vierter Ordnung wurde ein einfaches Galilei-Teleskop in einem räumlich chirp-modulierten Strahl nach dem zweiten, rekollimierenden Gitter des Dehners eingefügt. Eine detaillierte Gestaltung des Teleskops ist in Fig. 9(a) gezeigt. Es bestand aus einer einzelnen konkaven Linse 900 und einer einzelnen konvexen Linse 910. Die Brennweiten sowie der Durchmesser des eingehenden Strahls und die FWHM-Bandbreite der Pulse sind in der Figur angegeben. Die Ausrichtung und die Ordnung der Anordnung der Linsen ist wichtig, um den vorgegebenen Betrag der Phasenkompensation zu erzielen. Unter Verwendung einer numerischen Strahlverfolgung wurden die Teleskoplinsen ausgewählt, um Dispersionsglieder  $\beta_3^*$  und  $\beta_4^*$  derart zu haben, daß  $\beta_3^* = -\beta_3$  und  $\beta_4^* = -\beta_4$ .

Die Verwendung des erfindungsgemäßen Teleskops verbesserte drastisch die Qualität und Dauer der rekomprimierten Pulse. Autokorrelationsspuren von rekomprimierten Pulsen gemäß dem Dehner in standardisierter und abgewandelter Martinez-Bauweise sind in Fig. 9(b) gezeigt. Die Pulsdauer wurde von 400 fs auf 240 fs abgesenkt. Das waren nahe an der geschätzten umwandlungsbeschränkten Pulsdauer von 204 fs. Zweite harmonische S-TRUT-Spuren sind in Fig. 9(c) gezeigt. (Es ist interessant, die aufgetragenen Ergebnisse der Fig. 9(b) und 9(c) mit den Grafiken der Fig. 3(a) und 3(b) zu vergleichen.) Die Spuren zeigen, daß eine nicht lineare Phase in den rekomprimierten Pulsen praktisch nicht vorhanden ist, nachdem die zusätzliche Aberrations-Kompensation verwendet wurde.

Eine wichtige Aufgabe liegt in der Erzielung eines hochqualitativen Strahls nach der Anordnung mit dem Aberrations-Teleskop. Für dieses spezielle System zeigte die Strahlverfolgung, daß die Wellenfrontverzerrung in dem letzten Strahl von dem Martinez-Dehner kleiner als  $\lambda/4$  war, wie es durch die Toleranzbedingungen für Hauptaberrationen erforderlich ist (siehe ch. 9 in M. Born und E. Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press, Oxford, 1975). Ein experimentell beobachteter Strahl bestätigte diese Erwartung.

Der beobachtete Strahl war kreisrund ohne jegliche beobachtbare räumliche Chirp-Modulation.

Die perfekte Elimination von Phasen zweiter, dritter und vierter Ordnung wurde durch feines Abstimmen des Betrages der entsprechenden Dispersionsordnung erzielt, die durch das kompensierende Teleskop der Erfin-

5  
dung eingeführt wurde. Die Phase vierter Ordnung wurde durch Bewegung des Martinez-Teleskops entlang des Strahls zwischen den Gittern geregelt. Dies veränderte die Größe des parallel kollimierten Strahls nach dem zweiten Gitter, während es nicht die Dispersion der standard-Dehner-Konfiguration beeinflusste. Aufgrund der Abhängigkeit vierter Ordnung dieses Gliedes von der Strahlgröße ergab diese Regelung einen ausreichend großen Einstellbereich. Das Glied dritter Ordnung wurde durch Drehen des Galilei-Teleskops bezüglich des kollimierten Strahls geregelt. Das Glied zweiter Ordnung wurde in Übereinstimmung gebracht, indem die geeigneten Gitterabstände in einer Dehner- und Kompressoranordnung ausgewählt wurden.

## 2. Hybrid-Chirp-Pulsverstärkungssystem bestehend aus einer auf Faser beruhenden Mikrojoulepulskeimquelle und einem Alexandrit-gepumpten regenerativen Alexandrit-Verstärker 10

Die experimentelle Einrichtung des Hybridfaser- und Alexandrit-CPA-Systems ist in Fig. 10 gezeigt. Es besteht aus einem ummantelten gepumpten modenverkoppelten Faseroszillator 100, einem Beugungsgitterdehner 110, einem Dreistufenfaserverstärker 120, einem nicht linearen Frequenzverdopplungskristall 130, einem Alexandrit-gepumpten regenerativen Alexandrit-Verstärker 140 und einem Beugungsgitterpulskompressor 150. Der regenerative Verstärker 140 wurde durch den Alexandrit-Pumplaser 145 gepumpt. 15

Der Oszillator wird mit einem 1-W-Diodenlaser mit einem breiten Bereich (nicht gezeigt) gepumpt. Er sieht Pulse mit 20 MHz und 170 fs vor. Die Verwendung von einer Laserdiode mit einem breiten Bereich verringert die Systemkosten beträchtlich. Beugungsgitter in dem Pulsdehner 110 sind in einer Martinez-Bawaisenkonfiguration angeordnet. Die Gitter wurden holographisch hergestellt und haben 1200 Linien/mm und bieten eine maximale Gitterwirksamkeit bei 1550 nm. Der Einfallswinkel für den Eingangsstrahl ist auf  $71^\circ$  gesetzt. Die anfänglichen Pulse werden auf eine Dauer von ungefähr 700 ps gedehnt. Die gedehnten Pulse werden in einen mehrstufigen Faserverstärker 120 eingespeist. 20

Jede der drei Verstärkerstufen ist laserdiodengepumpt. Die Pumpleistungen und -wellenlängen sind 50 mW bei 1480 nm in der ersten Stufe, 200 mW bei 980 nm in der zweiten Stufe und 400 mW bei 960 nm in der letzten Stufe. Drei akustooptische Schalter (nicht gezeigt) wurden am Eingang jedes der Verstärker verwendet, um eine Pulswiederholungsrate zu regeln und die spontane Emission gegen ein Sättigen der nachfolgenden Stufen zu blockieren. Die akustooptischen Gatter wurden mit den Subharmonischen der Faseroszillatorwiederholungsrate betrieben. Dies ermöglicht es, maximale Pulsenergien aus jeder der Verstärkungsstufen herauszuziehen. Die Pulsenergie am Eingang der ersten Stufe ist 12 pJ, an der zweiten Stufe 5 nJ und an der dritten Stufe  $\approx 1 \mu\text{J}$ . Für die dritte Verstärkungsstufe wird eine Faser mit breiter Modusfläche verwendet, um nicht lineare Effekte bei Mikrojoulepulsenergien zu verringern und die kompressible Ausgangsenergie zu steigern. Mit dieser speziellen Konfiguration wurden Energien bis zu  $\approx 20 \mu\text{J}$  erhalten. 25 30

Das verstärkte Pulsspektrum hat eine ungefähr dreimal engere Bandbreite als das anfängliche des modenverkoppelten Oszillators. Das ist das Ergebnis des Ertragschmälerungseffektes bei  $\approx 60$  dB Verstärkung des Mehrstufenfaserverstärkers. Aufgrund dieser Wirkung verringert sich auch die Dauer der gedehnten verstärkten Pulse auf 200–300 ps, wie aus der Bandbreite des abschließenden Spektrums geschätzt wird. Das Spektrum ist in Fig. 11(a) gezeigt. 35

Zum wirkungsvollen Frequenzverdoppeln von langen Pulsen wurden  $\text{LiNbO}_3$ -Krystalle (PPLN) mit Quasi-Phasen-Übereinstimmung verwendet. Der allgemeine Vorteil eines nicht linearen Quasi-Phasen-Übereinstimmungsmediums liegt in der Möglichkeit, eine Phasenübereinstimmung bei jeder Wellenlänge innerhalb des Transparenzbereichs des Krystalls, bei jeder Betriebstemperatur und unter Verwendung irgendwelcher Komponenten des nicht linearen Anfälligkeitstensors herzustellen (M. M. Fejer, G. A. Magel, D. H. Jundt, und R. L. Byer, "Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation Tuning and Tolerances," IEEE J. Quant. Electron. QE-28, 2631 (1992)). Dies ermöglicht einen drastischen Anstieg der Frequenzumwandlungswirksamkeit durch Auswahl der höchsten nicht linearen Koeffizienten und Beseitigen des räumlichen Abwanderns zwischen den Grundstrahlen und den zweiten harmonischen Strahlen. Im Fall von  $\text{LiNbO}_3$  kann ein Quasi-Phasen-Übereinstimmen unter Verwendung eines nicht linearen Koeffizienten  $d_{33}$  ( $= 27 \text{ pm/V}$ ) erzielt werden, der mehr als 10 mal größer als die typischen nicht linearen Koeffizienten ist, die beim Doppelbrechungs-Phasen-Übereinstimmen verfügbar sind (beispielsweise ist  $d_{22}$  von BBO gleich  $2,3 \text{ pm/V}$ ). Sowohl die Hauptwellen als auch die zweiten harmonischen Wellen können derart ausgewählt sein, daß sie dieselbe Polarisierung haben (beispielsweise zur Verwendung von  $d_{33}$  müssen beide Wellen außerordentlich polarisiert sein), wodurch das Strahlabwandern beseitigt ist und folglich die maximale verfügbare Wechselwirkungslänge maximiert wird. Das Quasi-Phasen-Übereinstimmen der Lithium-Niobat-Krystalle kann durch periodisches Umkehren des Vorzeichens der nicht linearen Empfänglichkeit erzielt werden, die durch elektrisches Polieren hervorgerufen wird (L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer, R. L. Byer, W. R. Bosenberg, J. W. Pierce, "Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled  $\text{LiNbO}_3$ ," J. Opt. Soc. Am. B. 12, 2102 (1995)). In den beschriebenen Experimenten wurden periodisch gepolte Lithium-Niobat(PPLN)-Krystalle mit einer Modulationsperiode von  $\approx 19 \mu\text{m}$  zum Quasi-in-Übereinstimmung-bringen der Phasen erster Ordnung bei  $\approx 1550 \text{ nm}$  verwendet. Die exakte Phasenübereinstimmungswellenlänge wird durch Aufheizen des Krystalls auf die erforderliche Temperatur (wobei die Abstimmungsrate  $\approx 0,183 \text{ nm/C}^\circ$  ist) ausgewählt. Typische Betriebstemperaturen waren im Bereich von  $20^\circ - 70^\circ \text{ C}$ . Beispiellängen des PPLN von 400, 920 und  $1250 \mu\text{m}$  hatten jeweils Frequenzverdopplungsbandbreiten von 31,6, 13,8 und  $10,12 \text{ nm}$ . 40 45 50 55 60

Oberhalb einer Eingangspulsenergie von 100 nJ ist die Erzeugung zweiter Harmonischer mit einer Umwandlungswirksamkeit von 10–12% gesättigt, wodurch die wesentliche Verbesserung im Vergleich zu den Zehnern von Mikrojoules angedeutet sind, die erforderlich sind, um die Sättigung mit herkömmlichen doppelbrechungsphasen-übereinstimmenden Krystallen zu erreichen. Das zweite harmonische Spektrum von 300 ps-Pulsen ist in Fig. 11(b) gezeigt. Dies ist zweimal breiter (4 nm) als das zweite harmonische Spektrum (1,9 nm), das mit den 65



komprimierten Femtosekunden-Pulsen erreicht wird. Diese Wirkung wird durch das temporäre Abwandern in dem PPLN-Krystall hervorgerufen. Die GVD ist bei den Hauptwellenlängen und den zweiten harmonischen Wellenlängen unterschiedlich, wobei die vorübergehende Verzögerung zwischen diesen beiden Pulsen mit  $\approx 300$  fs/mm angegeben ist. Der Effekt dieser Verzögerung ist für gedehnte Pulse mit 300 ps vernachlässigbar, wird aber für komprimierte Pulse im Femtosekundenbereich wichtig und führt zu einem Anstieg der Dauer und einer Verringerung der Spektralbreite der SH-Pulse im Femtosekundenbereich (W. H. Glenn, "Second-Harmonic Generation by Picosecond Optical Pulses," IEEE J. Quant. Electron. QE-5, 284 (1969)). Offensichtlich ist es sehr wünschenswert, das breiteste Spektrum zu bewahren, da es zur kürzesten Dauer der abschließend verstärkten und rekomprimierten Pulse führt.

Die Vorteile, die aus der Verwendung des Verdopplungskrystals 130 gemäß der Erfindung folgen, sind vielfältig. Natürlich ist ein insgesamt wichtiges Merkmal die Fähigkeit der Kombination einer kompakten Einspeisungsquelle mit einem massiven Hochenergieverstärker, wie bezüglich der Fig. 1(b) bemerkt ist. Andere Vorteile können offensichtlich gemacht werden, wenn berücksichtigt wird, wie ein System ohne die Verwendung des erfindungsgemäßen Verdopplungskrystals 130 aufzubauen wäre. Ohne das erfindungsgemäße Frequenzverdopplungskrystal 130 müßte man nämlich die Triggerelektronik verwenden, wie in Fig. 1(b) gezeigt ist, um den regenerativen Verstärker 140 zu aktivieren. Bei Verwendung der Verdopplungskristalle 130 zusammen mit der Anordnung, die in Fig. 8 gezeigt ist, ist der Bedarf für die Triggerelektronik beseitigt.

In ähnlicher Weise wäre ohne die Verdopplungskristalle 130 der Erfindung der Strahl von dem Dreistufenverstärker 120 in einem Kompressor und -Frequenzverdoppler zu komprimieren, bevor er in den regenerativen Verstärker eintritt. Dazu müßten natürlich mehr massive Elemente in das System eingeführt werden. Auch hier beseitigt die Verwendung der erfindungsgemäßen Verdopplungskristalle 130 den Bedarf für eine derartige Anordnung.

Die mit einem Faserverstärker erhaltenen Pulsenergien sind im wesentlichen an der oberen Grenze von Einzelmodus-Fasern. Obwohl die Sättigungsfluenzen relativ hoch sind ( $2-3$  J/cm<sup>2</sup>) sind die tatsächlichen Pulsenergien aufgrund des engen Querschnitts des Einzelmodus-Faserkerns auf  $1-100$   $\mu$ J beschränkt. Für höhere Pulsenergien müssen massive Verstärker verwendet werden. Eine mögliche Auswahl ist ein Farbmittenverstärkungsmedium, Cr:YAG, Erbium-dotiertes Glas, Alexandrit, Ti:Sapphir, usw. Die Auswahl wird hier auch durch die spektrale Ertragsposition eines Mediums bestimmt, die entweder die Grundlegende oder zweite Harmonische einer Faserquelle sein muß.

Bei der insbesondere beschriebenen experimentellen Verwirklichung haben die Erfinder einen regenerativen Alexandrit-Verstärker zum Verstärken der Pulsenergien auf ein Millijoule-Niveau verwendet. Die Alexandrit-Ertragsbandbreiten erstrecken sich von 700 bis 850 nm, was zur Verstärkung der zweiten harmonischen Pulse von einer Erbium-dotierten Faserquelle geeignet ist.

Bei der vorliegenden Gestaltung eines regenerativen Verstärkers wurde eine andere Eigenschaft von Alexandrit herausgefunden: Die Veränderung seiner Absorptionseigenschaften mit der Temperatur (M. L. Shand, J. C. Walling, und H. Jenssen, "Ground State Absorption in the Lasing Wavelength Region of Alexandrite: Theory and Experiment", IEEE J. Quant. Electron. QE-18, 167 (1982)). Der Alexandrit-Verstärker 140 wurde mit einem anderen Alexandrit-Pumplaser 145 gepumpt wobei die beiden Verstärkungsmedien bei unterschiedlichen Temperaturen arbeiteten. Der Pumplaser 145 wurde ungefähr bei Raumtemperatur ( $\approx 50^\circ\text{C}$ ) gehalten und der Verstärker 140 wurde bei erhöhten Temperaturen gehalten, um ein Pumplicht bei 735 nm zu absorbieren. Das Laserpumpen von Alexandrit mit Alexandrit gibt den Vorteil des Anstiegs der Helligkeit des Pumpens für einen regenerativen Verstärker.

Der regenerative Verstärker kann nicht quer gepumpt werden, weil die Helligkeit der Multimoduslaserdioden mit breitem Bereich nicht ausreichend ist, um ein ausreichend gutes Modus-Übereinstimmen zu erzielen. Für optimale Ergebnisse sollte der Verstärker im TMOO-Modus längs gepumpt werden. Das Längspumpen mit einer Diode erfordert Einzelmodus-Laserdioden, die nicht stark angeregt werden. Andererseits können Multimodusdioden nur mit einer komplizierten Strahlformoptik verwendet werden. Die vorteilhafte, durch die Erfindung vorgesehene Lösung liegt darin, den Alexandrit-Pumplaser 145 quer mit (nicht gezeigten) Dioden zu pumpen und den Ausgang des Alexandrit-Pump Lasers 145 als Pumpstrahl für den regenerativen Verstärker 140 zu verwenden. Selbst wenn der Ausgang dieses dioden-gepumpten Alexandrits im Mehrfach-quer-Modus ist, ist seine Helligkeit von  $\approx 1,5 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup>-sr einige Größenordnungen höher als die Helligkeit, die mit Multimoduslaserdioden erhältlich ist. Dadurch steigt die Gesamtwirksamkeit an und trägt dazu bei, einen einzelnen, beugungsbegrenzten Quer-Modusausgang von dem regenerativen Verstärker 140 zu erhalten. Ein zusätzlicher Vorteil des Längspumpens liegt darin, daß die thermischen Linsenwirkungen in dem Laserstab verringert sind.

Frequenzverdoppelte Pulse wurden in den regenerativen Alexandrit-Verstärker 140 eingespeist, wobei nach  $\approx 60$  Durchtritten die Pulsenergie 10 mJ erreichte. Bei dieser speziellen experimentellen Einrichtung wurde der Alexandrit-Pumplaser 145 mit 100 J pro Puls blitzlampen-gepumpt. Diese Geometrie ermöglicht jedoch ein wirksames Laserdioden-Pumpen. Der Pumplaser 145 erzeugte bis zu 1 J pro Puls in 150  $\mu$ s Pulsdauer und bei 10 Hz Wiederholungsrate. Die Ausgangswelle war zwischen 720 bis 760 nm bei einer Maximalenergie bei 735 nm abstimmbare. Der Pumplaser 145 hatte einen Multimodus-Raum-Ausgang mit einer Strahlgröße von 7 bis 10 mm. Zur Absorption des Pumplichts wurde der Alexandrit-Verstärker 140 bei  $250-350^\circ\text{C}$  gehalten. Mit der vorteilhaften Einrichtung der vorliegenden Erfindung wurde somit möglich, einen Alexandrit-Pumplaser zu verwenden, um einen regenerativen Alexandrit-Verstärker zu pumpen.

Ein interessantes Merkmal der experimentellen Einrichtung lag darin, daß die ursprünglichen Femtosekunden-Pulse bei 1550 nm gedehnt wurden und komprimierte Pulse bei  $7-75$  nm erhalten wurde. Zum In-Übereinstimmung-Bringen des Dehners 110 und des Kompressors 150 wurde der Kompressor mit Gittern versehen, die 2400 Linien/mm hatten. Dies ermöglichte,  $\lambda/d$  ( $d$  = Gitterperiode) identisch zu einer der Dehnergitter mit 1200 Linien/mm bei 1550 nm zu haben und führte zu identischen Dispersionseigenschaften dieser Gitter.



Schließlich ist es sinnvoll zu erwähnen, daß das Verfahren, das zur Steigerung der Pumpheelligkeit für den regenerativen Verstärker 140 (Alexandrit-gepumptes Alexandrit) verwendet wird, auch auf das Pumpen eines Faserverstärkers ausgedehnt werden kann. Bei Faserverstärkern ist der herkömmliche Weg bei der Lösung des Problems der Pumpheiligkeitsumwandlung die Doppelmantelgeometrie. Ein Mehrfachmodus-Pumpen einer Laserdioden mit einem breiten Bereich oder einem Diodenfeld breitet sich in einer Pumpummantelung aus, während sich das Signal in einem Einzelmoduskern ausbreitet, das durch diese Ummantelung umgeben ist (H. Po, J. D. Cao, B. M. Laliberte, R. A. Minns, R. F. Robinson, B. H. Rockney, R. R. Tricca und Y. H. Zhang, "High Power Neodymium-Doped Single Transverse Mode Fibre Laser," Electron. Lett. 29, 1500 (1993)). Die gepumpte Energie wird durch das aktive Verstärkungsmedium des Kerns absorbiert. Diese Absorption ist jedoch viel weniger wirksam als für die direkte Pumpausbreitung in dem Einzelmoduskern und erfordert beträchtliche Co-Ausbreitungslängen, um praktischen Wirkungsgrade derartiger Verstärker zu erreichen. Zur Erzeugung von Mikrojoule-Pulsen müßte ein Faserverstärker so kurz wie möglich sein, um die nicht linearen Effekte bei den maximalen Spitzenleistungen zu verringern. Dadurch wird die Ummantelungspumpgeometrie für diese Bauart der Hochenergieverstärker ineffizient.

Eine Lösung, die durch die vorliegende Erfindung vorgesehen ist, läge darin, einen Einzelmodus-Hochenergie-Verstärker mit einem anderen mantel-gepumpten Faserlaser zu pumpen. Dies ist möglich aufgrund der Ertrags-eigenschaften einer Erbium-dotierten Faser. Für Erbium-dotierte Standardfasern erstreckt sich das Ertragspektrum von 1530 nm bis  $\approx$  1570 nm. Durch Verändern des Dotierinhalts und der Dotierkonzentrationen kann der Absorptionsquerschnitt bei 1530 nm größer als der Emissionsquerschnitt gemacht werden und eine derartige Faser kann mit einem anderen Er-dotierten Faserlaser gepumpt werden, der bei 1530 betrieben wird (H. Nakamura, A. Fujisaka, H. Ogoshi, "Gain and noise characteristics of erbium-doped fiber amplifier pumped at 1530 nm" Optical Fiber Communication, Technical Digest, Paper WK9, February—March 1996, San Jose, California).

Gemäß einem Gesichtspunkt der vorliegenden Erfindung wird ein mantel-gepumpter Er-Laser als eine Pumpquelle für einen Hochenergie-Faserverstärker verwendet. Ein derartiger Pumpaser kann entweder cw oder gepulst sein (beispielsweise Q-geschaltet). Dies würde die Kosten der Pumpquellen für Mikrojoule-Faser-CPA-Systeme drastisch reduzieren, da es ermöglichen würde, die teuren MOPA-Einzelmodusdioden mit den kostengünstigen und zuverlässigen Laserdioden oder -feldern mit breitem Bereich zu ersetzen.

Obwohl die Erfindung in ihren bevorzugten Ausführungsbeispielen und experimentellen Einrichtungen beschrieben und gezeigt wurde, sollte durch Fachleute verstanden werden, daß Abwandlungen in Formen und Einzelheiten gemacht werden können, ohne den in den beigefügten Patentansprüchen definierten Kern und Bereich der Erfindung zu verlassen.

Es ist ein System zur Verstärkung ultrakurzer optischer Pulse offenbart. Das offenbarte System hat eine verringerte Größe und eine verbesserte Robustheit, Zuverlässigkeit und Kosten-Nutzenwirksamkeit. Die offenbarte Erfindung ist insbesondere wirksam bei Systemen mit chirp-modulierter Pulsverstärkung (CPA), wobei die Pulse gedehnt, verstärkt und rekomprimiert werden. Gemäß einem Gesichtspunkt der Erfindung wird ein kompakter Dehner mit einem massiven Kompressor verwendet und die Kompatibilität zwischen beiden wird durch Einfügen eines Teleskops in die Bahn des kollimierten Strahls erreicht. Wahlweise wird die Kompatibilität des Dehners und des Kompressors durch Erzeugen eines nicht linear chirp-modulierten Bragg-Gitters in dem Faserdehner erreicht. Gemäß einem anderen Gesichtspunkt der Erfindung werden ein Faser- und Massivverstärker verwendet, um den Puls zu verstärken, und die Kompatibilität zwischen beiden wird durch Einfügen eines Verdopplungskristalls in die Bahn des Pulses zwischen den beiden Verstärkern erreicht. Ein anderer Gesichtspunkt des offenbarten Verstärkungssystems ist das Pumpen des Laserverstärkers mit einer Laserpumpe des gleichen Materials wie der Laserverstärker aber mit einem Betrieb unter unterschiedlichen Bedingungen.

#### Patentansprüche

1. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen mit:  
einem kompakten Dehner, der Lichtpulse aufnimmt und von sich gedehnte Lichtpulse abgibt;  
einem optischen Verstärker, der die gedehnten Lichtpulse aufnimmt und von sich verstärkte Lichtpulse abgibt;  
einem Kompressor, der die verstärkten Lichtpulse aufnimmt und von sich komprimierte Lichtpulse abgibt, wobei der Kompressor zumindest eine Lichtbahn hat, in der der verstärkte Puls kollimiert ist und wobei der Kompressor eine Linsenanordnung aufweist, die in die Lichtbahn eingefügt ist, wobei die Linsenanordnung eine Kollimation des verstärkten Puls erhält.
2. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Kompressor ein Kollimationsbeugungsgitter und einen Reflektor aufweist, wobei die Linsenanordnung in einer Lichtbahn zwischen dem Beugungsgitter und dem Reflektor liegt.
3. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Beugungsgitter durchlässig ist.
4. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Beugungsgitter reflektierend ist.
5. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Dehner ein Fasergitter aufweist.
6. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Dehner eine Dispersionsfaser aufweist.
7. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Dispersionsfaser des weiteren an ihrem Ende ein Reflexionselement aufweist.

8. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß das Reflexionselement ein Faraday-Drehspiegel ist.

9. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen mit:

einer Selbstphasenmodulationsfaser;

einem optischen Verstärker, der gedehnte Lichtpulse aufnimmt und von sich verstärkte Lichtpulse abgibt;

einem Kompressor, der die verstärkten Lichtpulse aufnimmt und von sich komprimierte Lichtpulse abgibt, wobei der Kompressor zumindest eine Lichtbahn hat, in der der verstärkte Puls kollimiert ist und wobei der Verstärker eine Linsenordnung aufweist, die in die Lichtbahn eingefügt ist, wobei die Linsenordnung eine Kollimation des verstärkten Pulses erhält.

10. System zur Erzeugung kurzer optischer Pulse mit:

einer kompakten Einspeisungsquelle, die Lichtpulse erzeugt;

einem optischen Verstärker, der die Lichtpulse aufnimmt und von sich verstärkte Pulse abgibt;

einem Kompressor, der die verstärkten Pulse aufnimmt und komprimierte Pulse abgibt, wobei der Kompressor zumindest eine kollimierte Lichtbahn hat und eine Linsenordnung aufweist, die in die kollimierte Lichtbahn eingefügt ist, wobei die Linsenordnung eine Kollimation erhält.

11. System zur Erzeugung kurzer optischer Pulse nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die kompakte Einspeisungsquelle eine abstimmbare Laserdiode aufweist.

12. System zur Erzeugung kurzer optischer Pulse nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die kompakte Einspeisungsquelle einen Oszillator, der kurze Lichtpulse erzeugt, und einen kompakten Dehner zum Dehnen der kurzen Lichtpulse aufweist.

13. System zur Erzeugung kurzer optischer Pulse nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die kompakte Einspeisungsquelle einen kompakten Dehner zum Dehnen der aufgenommenen Lichtpulse aufweist, wobei das System des weiteren einen kompakten Kompressor aufweist, der zwischen den optischen Verstärker und den Kompressor eingefügt ist, um die von dem optischen Verstärker aufgenommenen Lichtpulse vorzukomprimieren und die vorkomprimierten Lichtpulse dem Kompressor zuzusenden.

14. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen mit:

einem Dehner, der Lichtpulse aufnimmt und von sich gedehnte Lichtpulse abgibt, wobei der Dehner zumindest eine kollimierte Lichtbahn hat und wobei der Dehner eine Linsenordnung aufweist, die in die kollimierte Lichtbahn eingefügt ist;

einem optischen Verstärker, der die gedehnten Lichtpulse aufnimmt und von sich verstärkte Lichtpulse abgibt;

einem Kompressor, der die verstärkten Lichtpulse aufnimmt und von sich komprimierte Lichtpulse abgibt; wobei die Linsenordnung eine Kollimation des hindurchtretenden Lichts erhält.

15. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß der Dehner ein kollimierendes Beugungsgitter und einen Reflektor aufweist, wobei die Linsenordnung in einer Lichtbahn zwischen dem Beugungsgitter und dem Reflektor liegt.

16. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Beugungsgitter durchlässig ist.

17. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Beugungsgitter reflektierend ist.

18. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen mit:

einem Dehner, der Lichtpulse aufnimmt und gedehnte von sich Lichtpulse abgibt;

einem Kompensator zum Kompensieren einer nicht linearen Gruppengeschwindigkeitsdispersion, wobei der Kompensator zumindest eine kollimierte Lichtbahn hat und eine Linsenordnung aufweist, die in die kollimierte Lichtbahn eingefügt ist;

einem optischen Verstärker, der die Lichtpulse von dem Kompensator aufnimmt und kompensierte verstärkte Lichtpulse abgibt;

einem Kompressor, der die kompensierten verstärkten Lichtpulse aufnimmt und von sich komprimierte Lichtpulse abgibt, wobei

die Linsenordnung eine Kollimation der hindurchtretenden Lichtpulse erhält.

19. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß der Kompensator entweder ein durchlässiges Beugungselement oder ein durchlässiges Dispersionselement aufweist, wobei das Teleskop in einer Lichtbahn zwischen dem Beugungselement und dem Reflektor liegt.

20. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen mit folgenden Bauteilen:

einem Dehner, der Lichtpulse aufnimmt und von sich gedehnte Lichtpulse abgibt, wobei der Dehner ein nicht linear chirp-moduliertes Fasergitter aufweist;

einem optischen Verstärker, der die gedehnten Lichtpulse aufnimmt und von sich verstärkte Lichtpulse abgibt;

einem Kompressor, der die verstärkten Lichtpulse aufnimmt und von sich komprimierte Lichtpulse abgibt.

21. Verfahren zur Kompensation einer Fehldeckung einer nicht linearen Gruppengeschwindigkeitsdispersion zwischen einem Dehner und einem Kompressor in einem System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen, wobei das Verfahren ein Einfügen von zumindest einer Linsenordnung in einen räumlich chirp-modulierten kollimierten Strahl bei einem der Bauteile bestehend aus dem Dehner und dem Kompressor umfaßt, wobei die Linsenordnung eine Kollimation des hindurchtretenden Lichts erhält.

22. Verfahren zur Kompensation einer Fehldeckung einer nicht linearen Gruppengeschwindigkeitsdispersion zwischen einem Dehner und einem Kompressor in einem System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen, wobei das Verfahren ein Erzeugen eines nicht linear chirp-modulierten Bragg-Gitters in dem Dehner umfaßt.

23. Vorrichtung zum Verstärken gedehnter Ultrakurzpulse mit:  
 einem ersten Verstärkungsmedium mit einem vorbestimmten Verstärkungsband;  
 einem zweiten Verstärkungsmedium mit einem vorbestimmten Verstärkungsband, das sich nicht mit dem Verstärkungsband des ersten Verstärkungsmediums überdeckt;  
 einem nicht linearen optischen Krystall, der in eine Lichtbahn zwischen dem ersten und zweiten Verstärkungsmedium eingefügt ist, um ein In-Übereinstimmung-Bringen der Wellenlängen zwischen dem ersten und dem zweiten Verstärkungsmedium zu erzielen. 5
24. Bei einer Vorrichtung zum Verstärken gedehnter Ultrakurzpulse, wobei die Vorrichtung ein erstes Verstärkungsmedium mit einem vorbestimmten Verstärkungsband und ein zweites Verstärkungsmedium mit einem vorbestimmten Verstärkungsband aufweist, das sich nicht mit dem Verstärkungsband des ersten Verstärkungsmediums überdeckt, wobei ein Verfahren zum Erzielen einer Wellenlängenübereinstimmung zwischen dem ersten und zweiten Verstärkungsmedium durchgeführt wird, wobei das Verfahren das Einfügen eines nicht linearen optischen Krystalls in eine Lichtbahn zwischen dem ersten und zweiten Verstärkungsmedium umfaßt. 10
25. Optisches Verstärkungssystem mit:  
 einem Laserverstärker, der mit einem ersten Satz vorbestimmter Bedingungen betrieben wird;  
 einem Pumplaser, der in wesentlichen aus demselben Material wie der Verstärker besteht und unter einem zweiten Satz von vorbestimmten Betriebsbedingungen betrieben wird, die sich von dem ersten Satz der Betriebsbedingungen unterscheiden, wodurch Licht mit einer kürzeren Wellenlänge als die des Verstärkers emittiert wird und ein Absorptionsband des Verstärkers in Übereinstimmung gebracht wird. 15
26. Verfahren zum Betreiben eines optischen Verstärkungssystems, wobei das optische Verstärkungssystem einen Laserverstärker und einen Pumplaser aufweist, der im wesentlichen aus demselben Material wie der Verstärker besteht, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:  
 Betreiben des Laserverstärkers mit einem ersten Satz von vorbestimmten Bedingungen;  
 Betreiben des Pumplasers unter einem zweiten Satz von vorbestimmten Betriebsbedingungen, die sich von dem ersten Satz der Betriebsbedingungen unterscheiden, wodurch der Pumplaser Licht mit einer kürzeren Wellenlänge als die des Verstärkers emittieren läßt und wodurch der Pumplaser ein Absorptionsband des Verstärkers in Übereinstimmung bringen läßt. 20
27. Optisches Verstärkungssystem nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, daß der Verstärker ein regenerativer Alexandrit-Verstärker ist, der bei einer ersten Temperatur betrieben wird, wobei der Pumplaser ein Alexandrit-Pumplaser ist, der bei einer zweiten Temperatur betrieben wird, die gegenüber der ersten Temperatur erhöht ist. 25
28. Verfahren zum Betreiben eines optischen Verstärkungssystems nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, daß das Verstärkungsmedium ein regenerativer Alexandrit-Verstärker ist und der Pumplaser ein Alexandrit-Pumplaser ist, wobei der erste Satz der Betriebsbedingungen dazu führt, daß der Verstärkerlaser bei einer gegenüber der Raumtemperatur erhöhten Temperatur betrieben wird und wobei der zweite Satz der Betriebsbedingungen dazu führt, daß der Pumplaser bei Raumtemperatur betrieben wird. 30
29. Verstärkungssystem nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, daß der Laserverstärker ein Erbium-dotierter Faserverstärker ist und der Pumplaser ein Erbium-dotierter Faserpumplaser ist, wobei der Faserverstärker einen Absorptionsquerschnitt bei einer Lasertätigkeitswellenlänge des Pumplasers hat, wobei der Faserverstärker einen Emissionsquerschnitt erzeugt, der kleiner als der Absorptionsquerschnitt ist. 35
30. Verfahren zum Betreiben eines optischen Verstärkungssystems nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, daß das Verstärkungsmedium ein Erbium-dotierter Faserverstärker ist, wobei die Pumpe eine gepumpte Faser ist und wobei der erste Satz der Betriebsbedingungen und der zweite Satz der Betriebsbedingungen vordefiniert sind, um hervorzurufen, daß der Faserverstärker einen Absorptionsquerschnitt bei einer Lasertätigkeitswellenlänge des Pumplasers hat, und um des weiteren hervorzurufen, daß der Faserverstärker einen Emissionsquerschnitt erzeugt, der niedriger als der Absorptionsquerschnitt ist. 40
31. Verfahren zum Betreiben eines optischen Verstärkungssystems nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Satz der Betriebsbedingungen ein Dotieren des Faserverstärkers auf einen ersten Wert der Dotierung aufweist, wobei der zweite Satz der Betriebsbedingungen ein Dotieren der gepumpten Faser auf einen zweiten Wert der Dotierung aufweist, der von dem ersten Wert verschieden ist. 45
32. Verfahren zum Betreiben eines optischen Verstärkungssystems nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Satz der Betriebsbedingungen ein Dotieren des Faserverstärkers unter Verwendung eines vorbestimmten Dotierinhalts umfaßt, wobei der zweite Satz der Betriebsbedingungen ein Dotieren der gepumpten Faser unter Verwendung eines zweiten vorbestimmten Dotierinhalts umfaßt, der von dem ersten vorbestimmten Dotierinhalt verschieden ist. 50
33. Optisches Verstärkungssystem nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpfaser eine Q-geschaltete Laserpumpe ist. 55
34. Verfahren zum Betreiben eines optischen Verstärkungssystems nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpfaser ein Q-geschalteter Pumplaser ist.
35. Optisches Verstärkungssystem mit:  
 einem geschalteten regenerativen Verstärker, der Lichtpulse aufnimmt und die Lichtpulse verstärkt;  
 einem Verdopplungskrystall zum Verdoppeln der Frequenz des Lichtpulses, bevor die Lichtpulse in den regenerativen Verstärker eintreten;  
 eine Einrichtung zum Aufteilen der Lichtsignale, nachdem die Lichtsignale durch den Verdopplungskrystall 60

hindurchgetreten sind, aber bevor die Lichtpulse in den regenerativen Verstärker eintreten, um einen Hauptstrahl und einen Nebenstrahl des Lichtpulses zu erzeugen;  
eine Einrichtung zum Ablenken des Nebenstrahls zum Betätigen eines Schalters des geschalteten regenerativen Verstärkers.

36. Optisches Verstärkungssystem mit:

einem Oszillator zum Erzeugen von Lichtpulsen mit einer vorbestimmten Frequenz;

einem Dehner zum Dehnen der Lichtpulse;

einem kompakten Verstärker zum Verstärken der von dem Dehner erhaltenen Lichtpulse;

einem Verdopplungskristall, der die Lichtpulse von dem kompakten Verstärker aufnimmt und die Frequenz der Lichtpulse verdoppelt;

einem massiven Verstärker, der die Lichtpulse von dem Verdopplungskristall aufnimmt und die Lichtpulse verstärkt;

einem Kompressor, der die Lichtpulse von dem massiven Verstärker aufnimmt und die Lichtpulse komprimiert.

37. Optisches Verstärkungssystem nach Anspruch 36, dadurch gekennzeichnet, daß der massive Verstärker folgende Bauteile aufweist:

einen regenerativen Alexandrit-Laserverstärker; einen Alexandrit-Pumplaser;

wobei der Ausgang des Alexandrit-Pumplasers in den regenerativen Alexandrit-Laserverstärker eingespeist wird.

38. Optisches Verstärkungssystem nach Anspruch 37, dadurch gekennzeichnet, daß

der regenerative Alexandrit-Laserverstärker einen elektrooptischen Schalter umfaßt, wobei das System des weiteren aufweist:

einen Strahlteiler zum Teilen der Lichtpulse und zum Bilden einer Vielzahl von Lichtbahnen, wobei die Lichtpulse von einer der Lichtbahnen in den regenerativen Alexandrit-Laserverstärker eintreten und die Lichtpulse einer anderen der Lichtbahnen zum Schalten des elektro-optischen Schalters verwendet werden.

39. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen nach Anspruch 18,

gekennzeichnet durch

einen zweiten optischen Verstärker zum Verstärken der gedehnten Pulse, die von dem Dehner aufgenommen werden.

40. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen mit:

einem Dehner, der Lichtpulse aufnimmt und von sich gedehnte Lichtpulse abgibt;

einem optischen Verstärker, der die gedehnten Lichtpulse aufnimmt und von sich verstärkte Lichtpulse abgibt,

einem Kompressor, der die verstärkten Lichtpulse aufnimmt und von sich komprimierte Lichtpulse abgibt, wobei der Kompressor ein nicht linear chirp-moduliertes Fasergitter aufweist.

41. System zur Verstärkung von kurzen optischen Pulsen mit:

einem Dehner, der Lichtpulse aufnimmt und von sich gedehnte Lichtpulse abgibt;

einem optischen Verstärker, der die gedehnten Lichtpulse aufnimmt und von sich verstärkte Lichtpulse abgibt;

einem Kompressor, der die verstärkten Lichtpulse aufnimmt und von sich komprimierte Lichtpulse abgibt;

einem Gruppengeschwindigkeitsdispersionskompensator, der ein nicht linear chirp-moduliertes Fasergitter aufweist.

42. Optisches Verstärkungssystem mit:

einem Oszillator zum Erzeugen von Lichtpulsen mit einer vorbestimmten Frequenz;

einem Dehner zum Dehnen der Lichtpulse;

einem kompakten Verstärker zum Verstärken der von dem Dehner aufgenommenen Lichtpulse;

einem Strahlteiler zum Aufteilen der Lichtpulse;

einem massiven Verstärker, der einen elektrooptischen Schalter aufweist, der auf Lichtpulse von dem Strahlteiler anspricht.

43. System zum Erzeugen kurzer optischer Pulse mit:

einer kompakten Einspeisungsquelle, die Lichtpulse erzeugt;

einem optischen Verstärker zum Verstärken der optischen Pulse;

einem Kompensator zum Kompensation einer nicht linearen Gruppengeschwindigkeitsdispersion, wobei der Kompensator zumindest eine kollimierte Lichtbahn hat und eine Linsenordnung aufweist, die in die kollimierte Lichtbahn eingefügt ist;

einem Kompressor, der die kompensierten verstärkten Lichtpulse aufnimmt und von sich komprimierte Lichtpulse abgibt.

---

Hierzu 27 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -

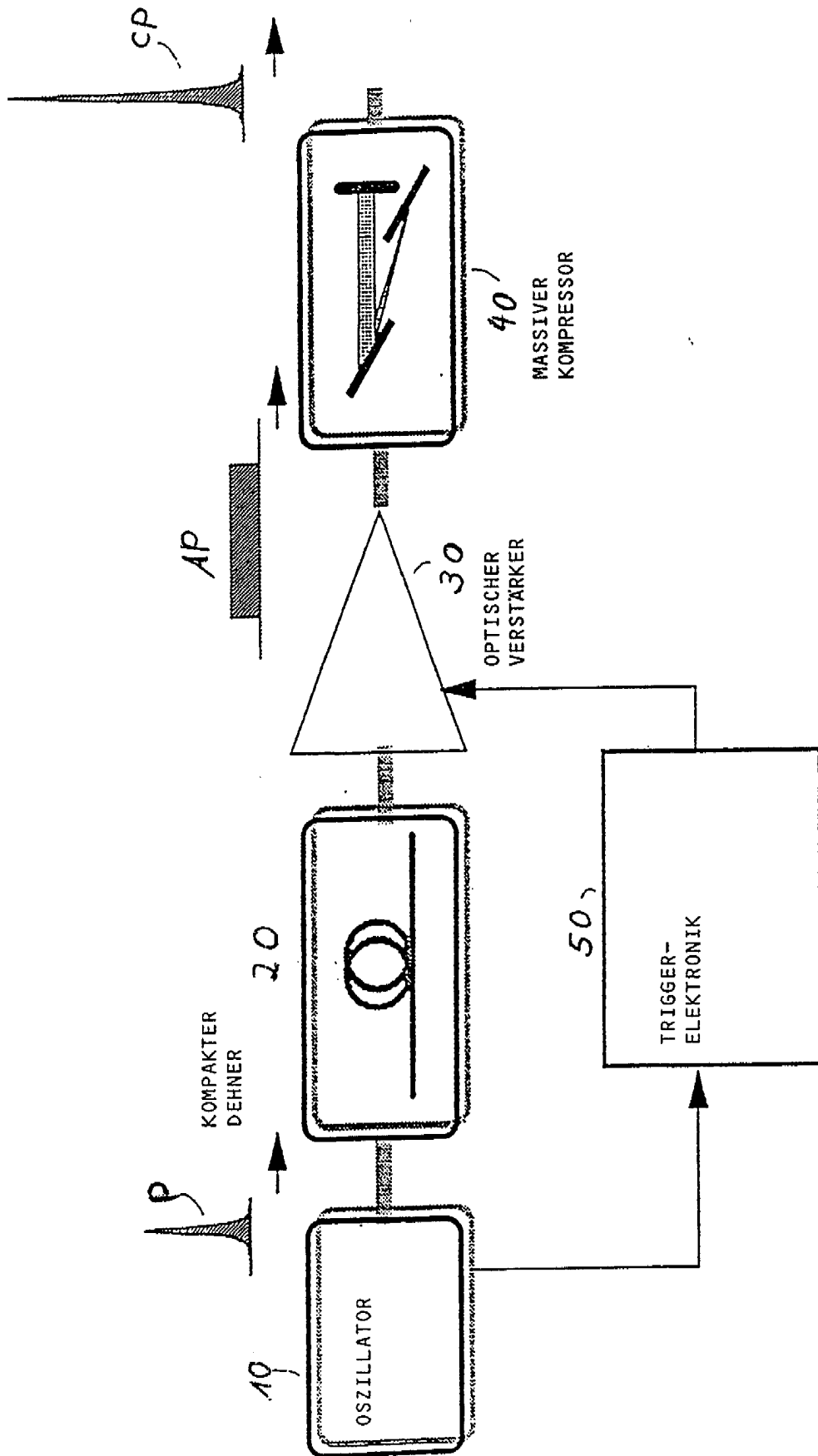


Fig 1 (a) \*

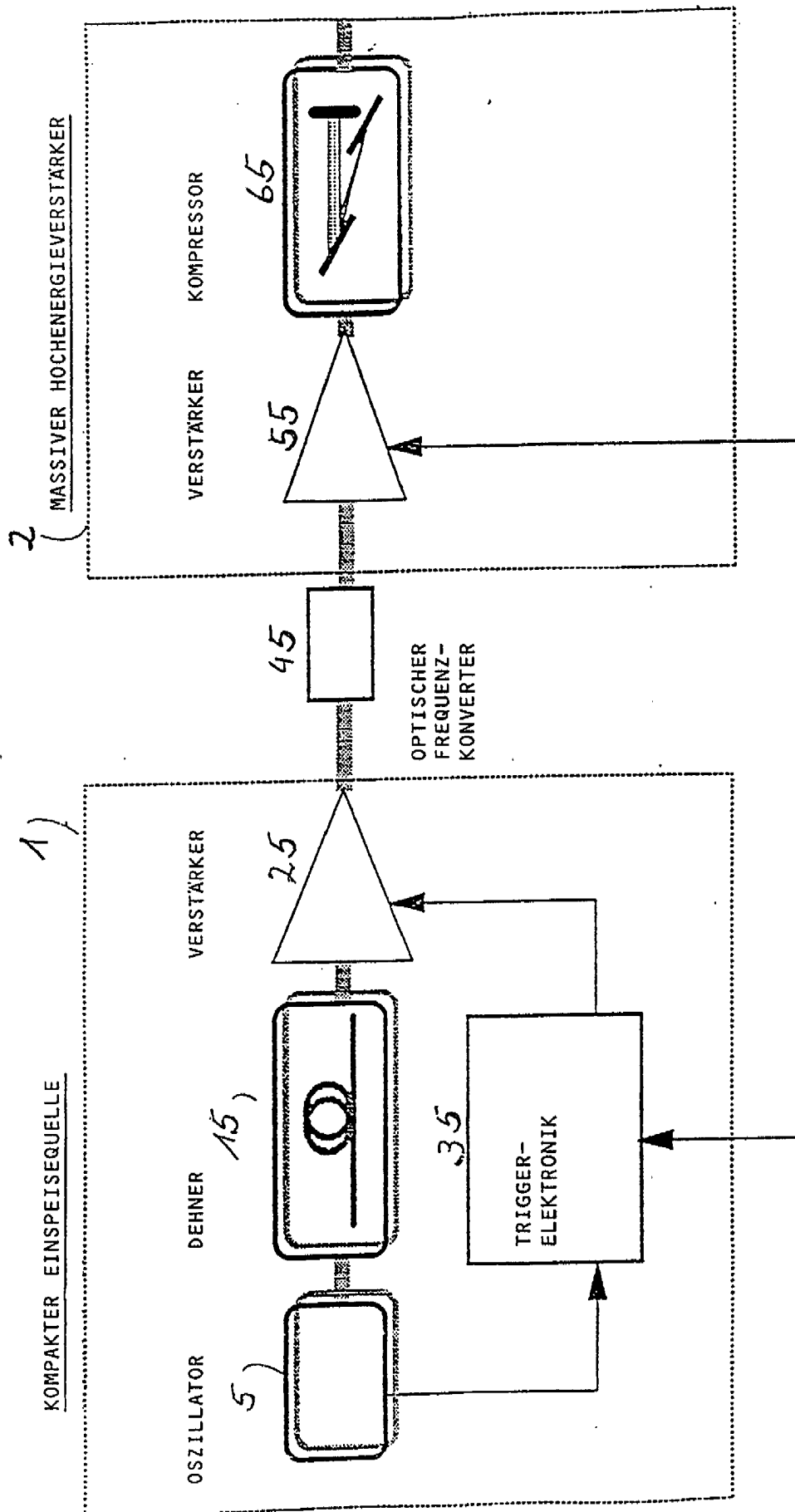


Fig 1 (b)



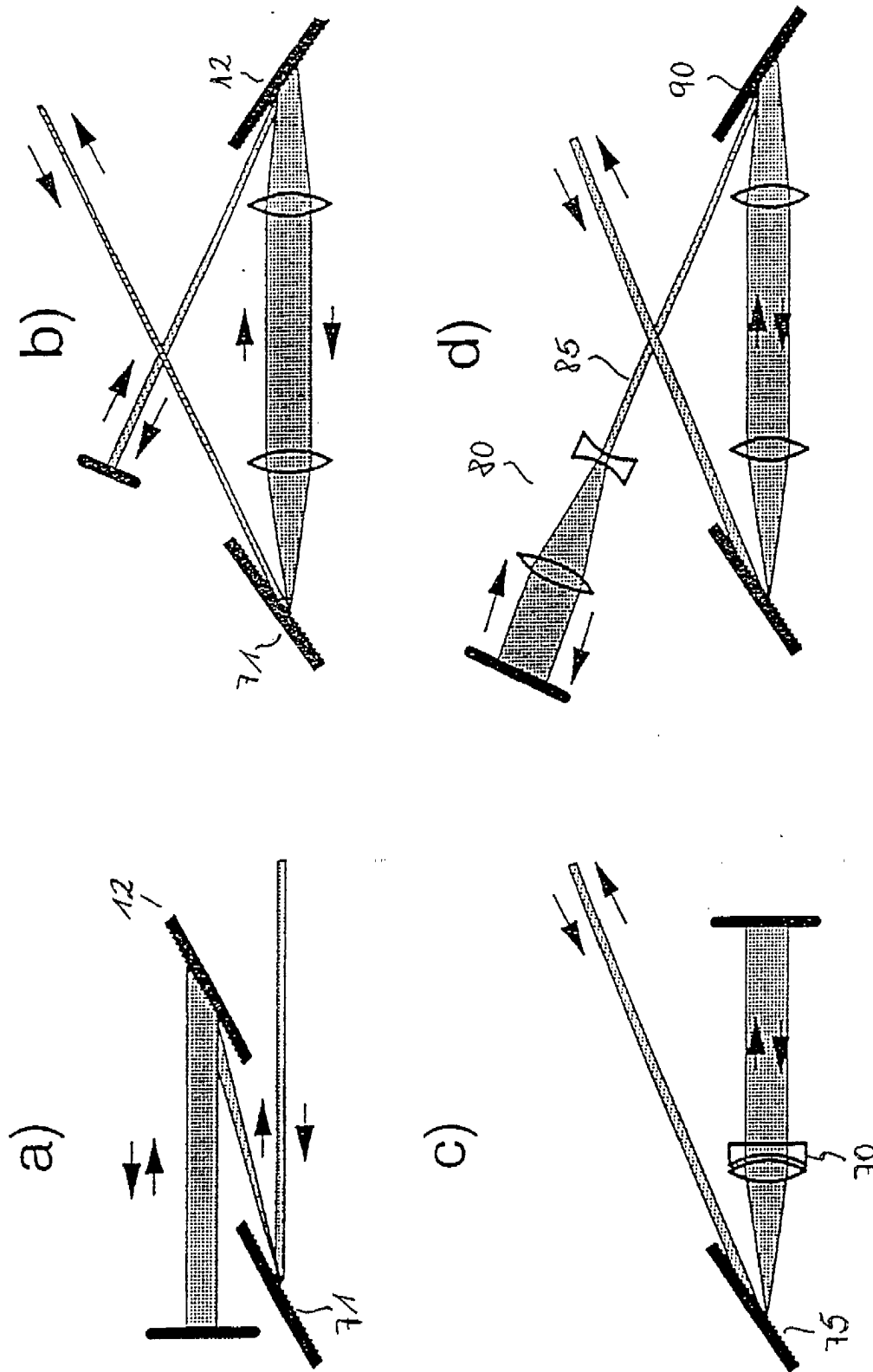


Fig. 2

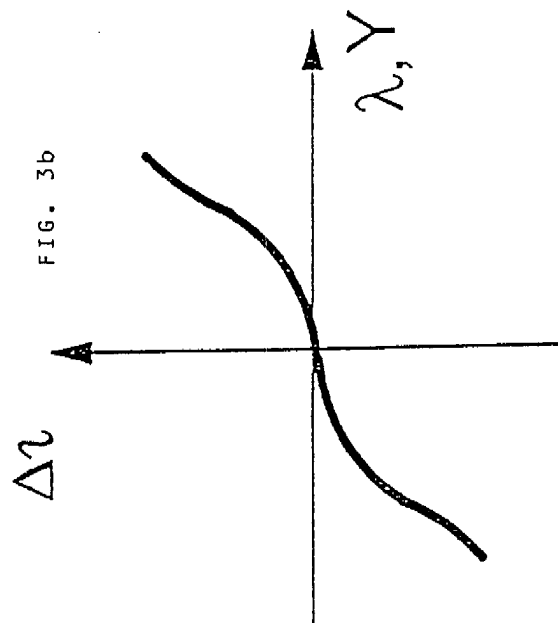
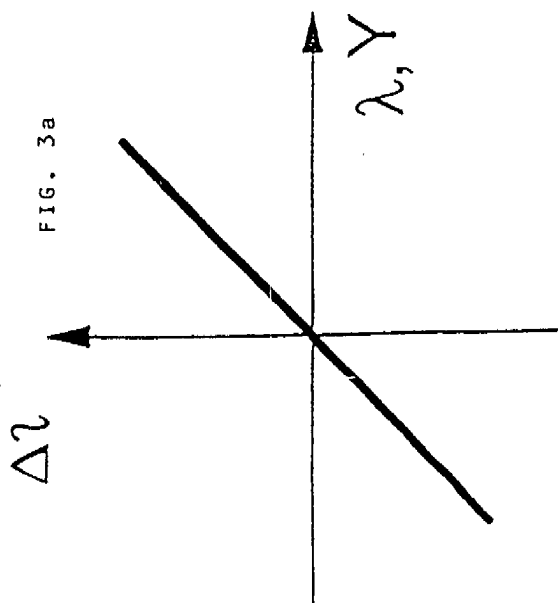


FIG. 3b



83

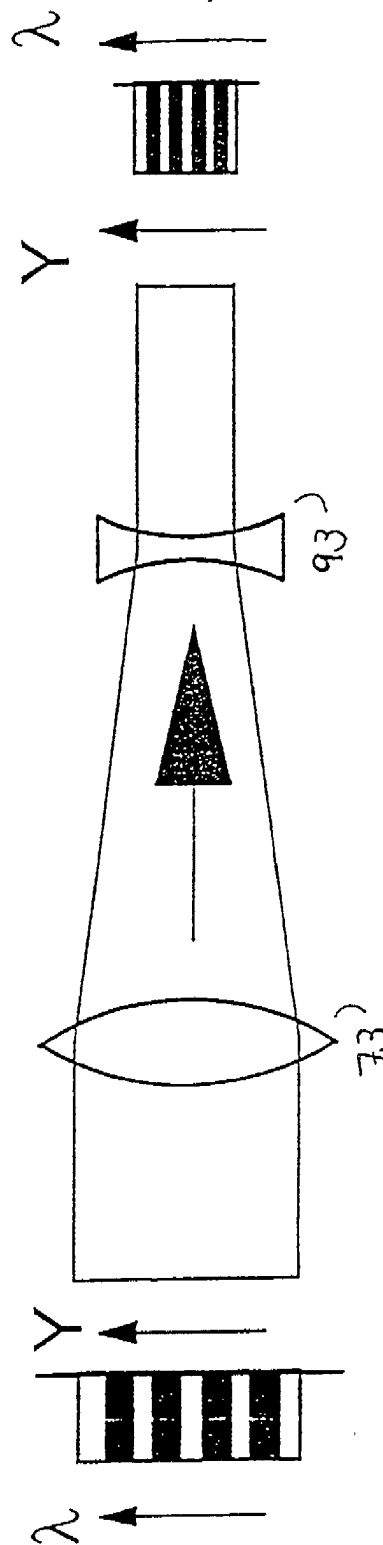


Fig. 3

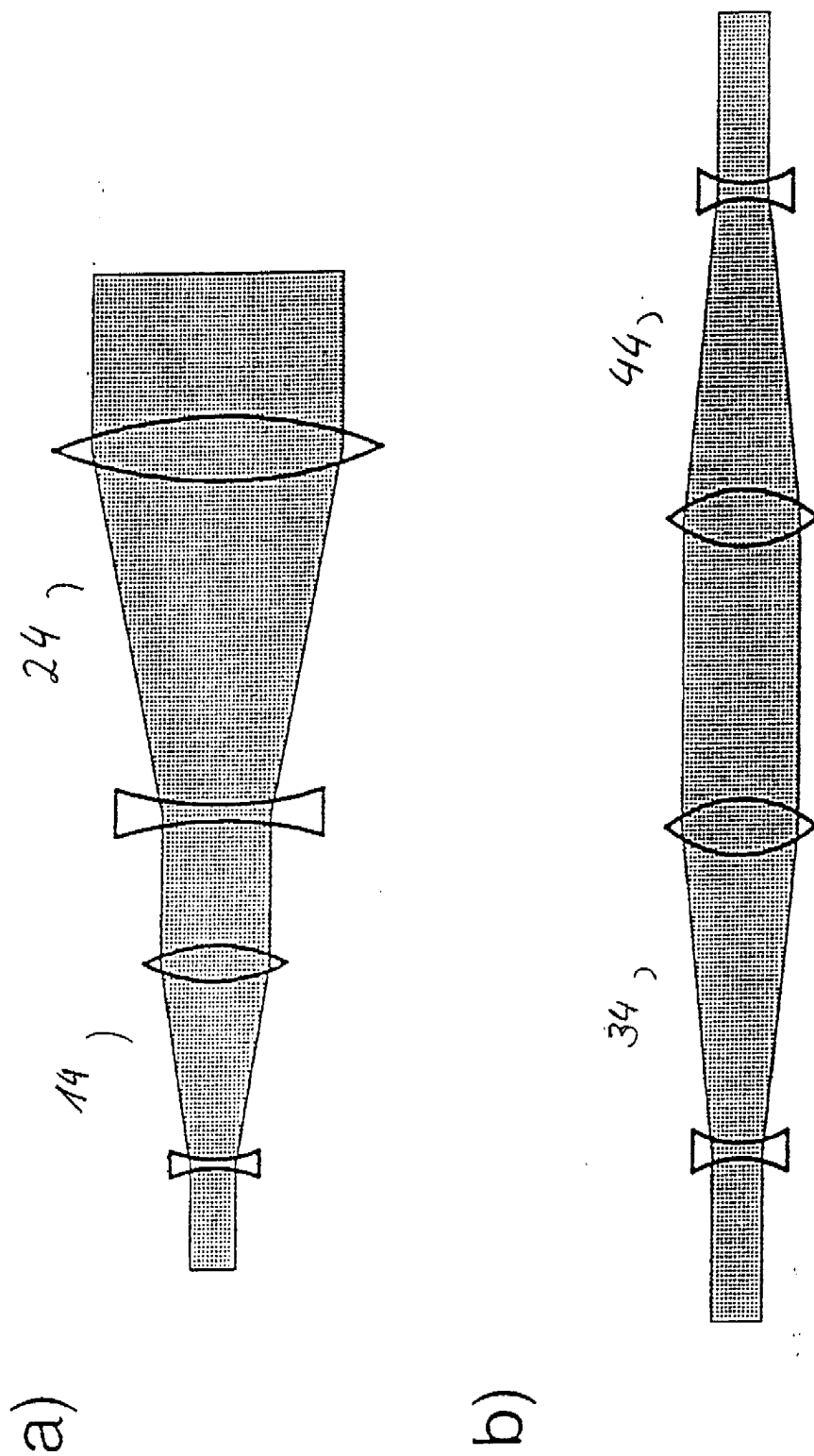


Fig. 4

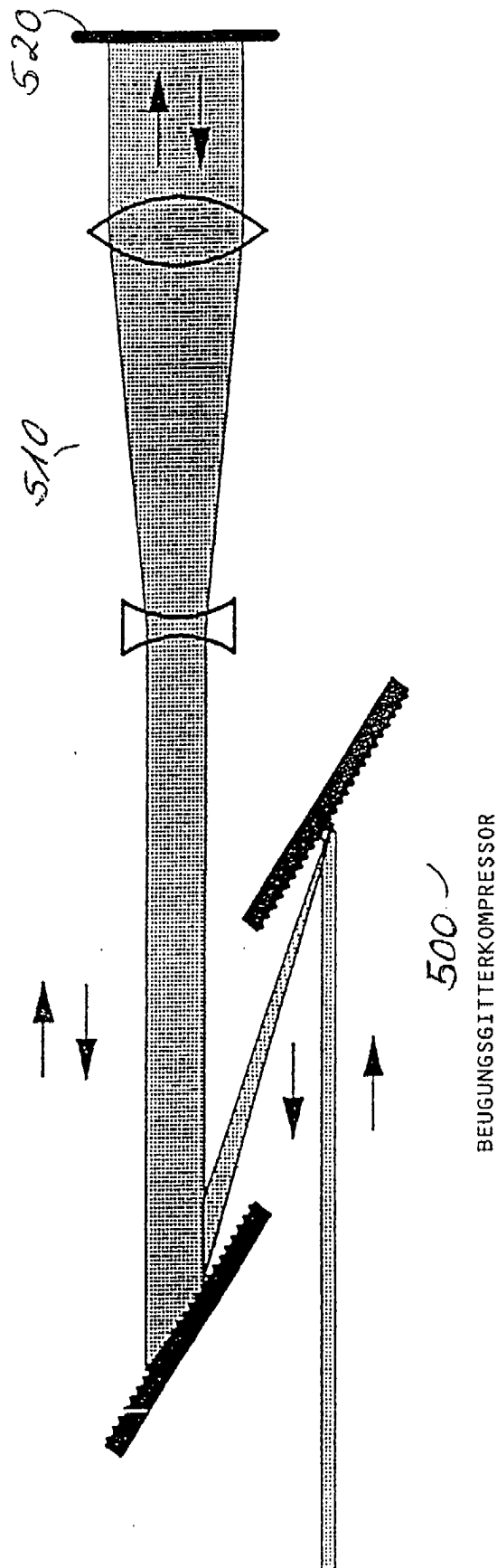


Fig. 5 (a)

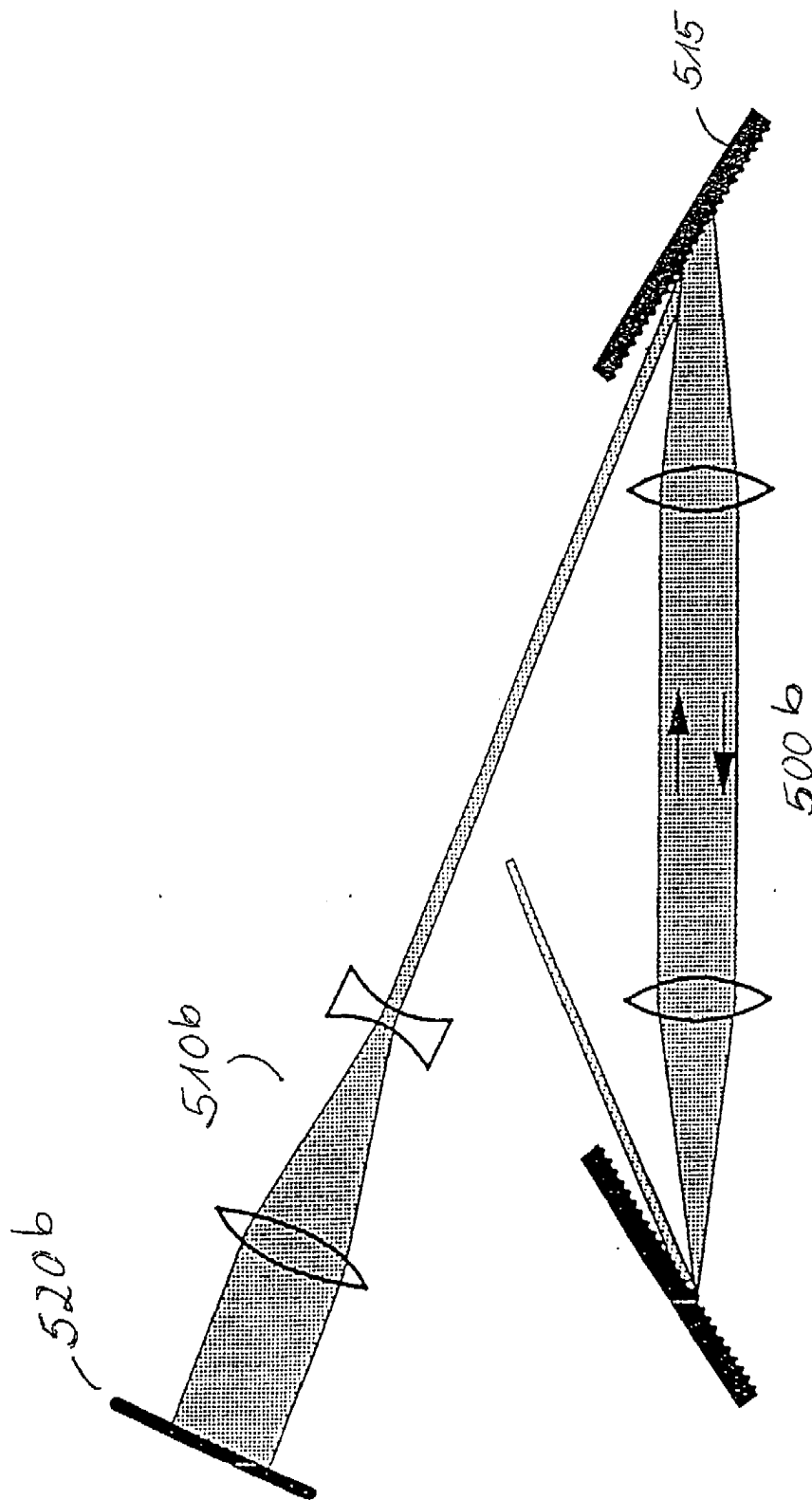


Fig. 5 (b)

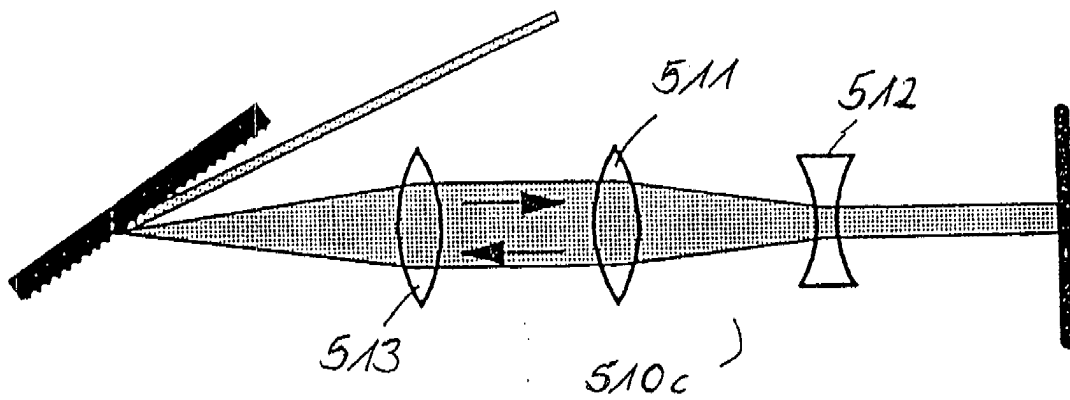


Fig. 5 (c)

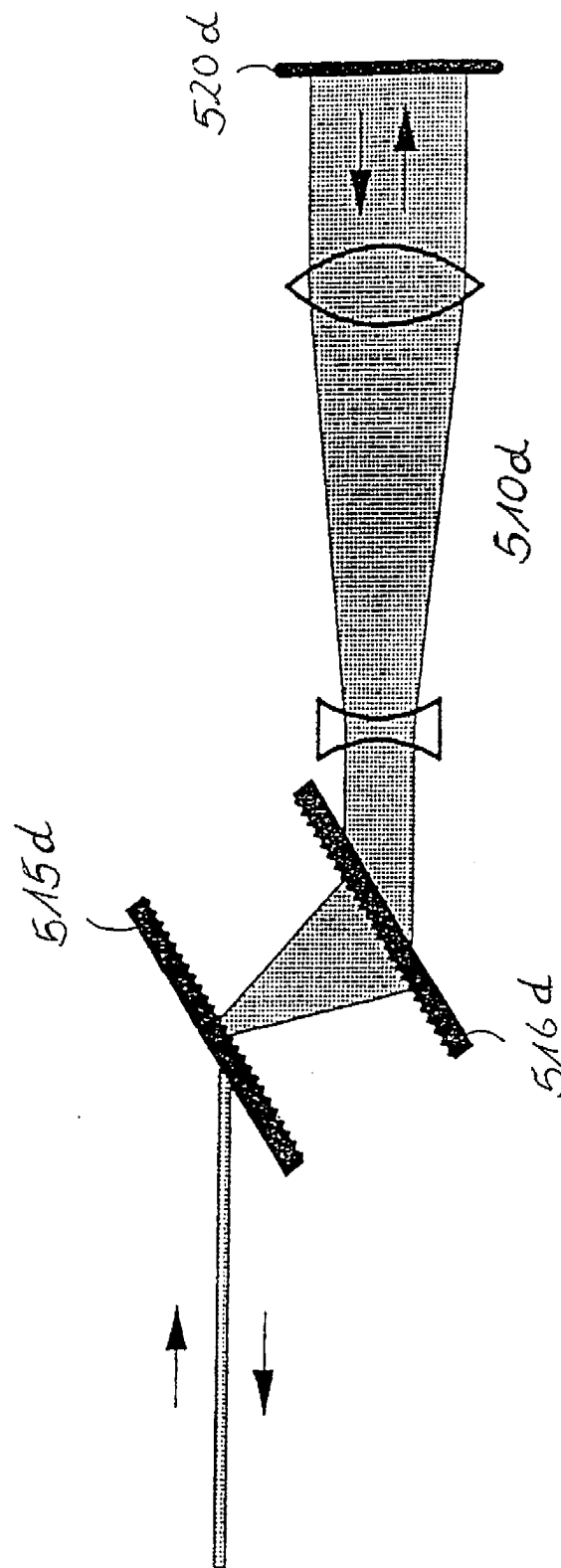


Fig. 5 (d)



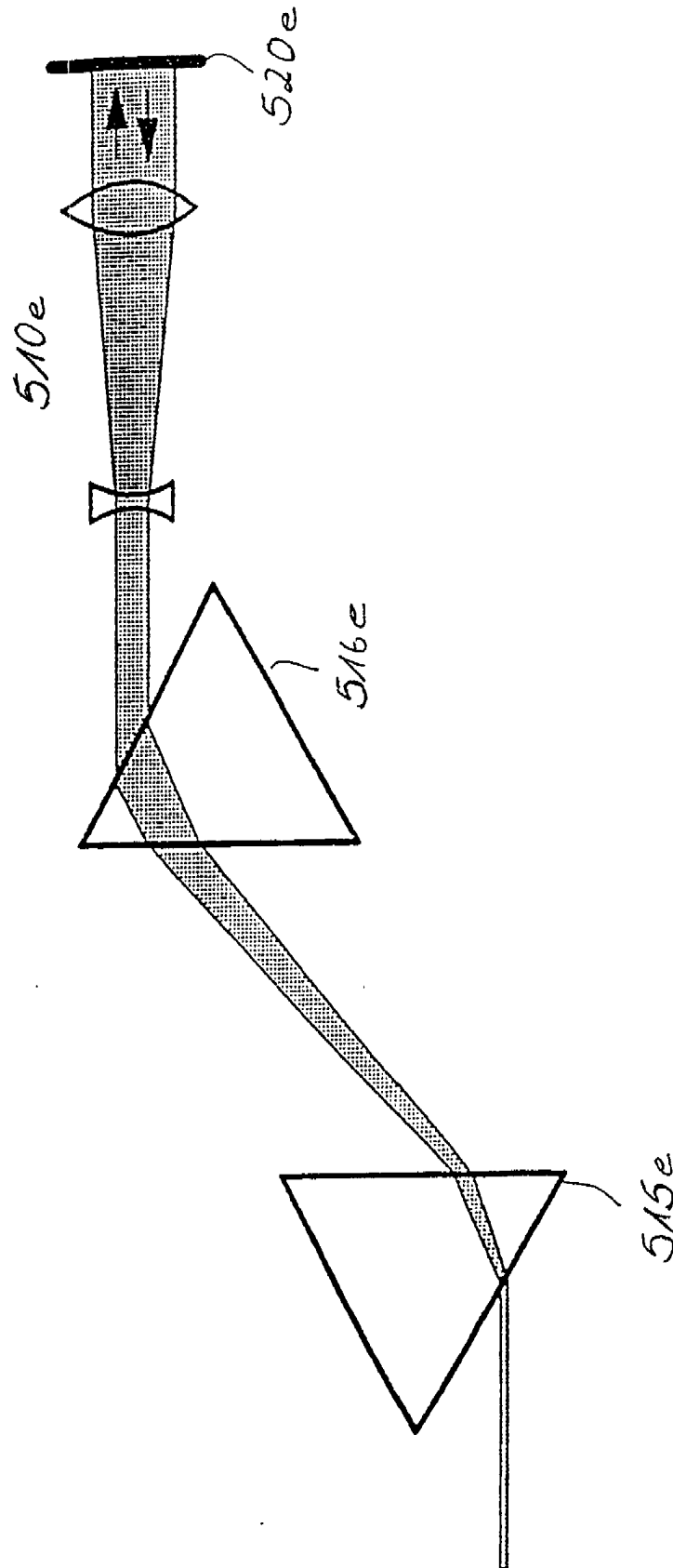


Fig. 5 (e)

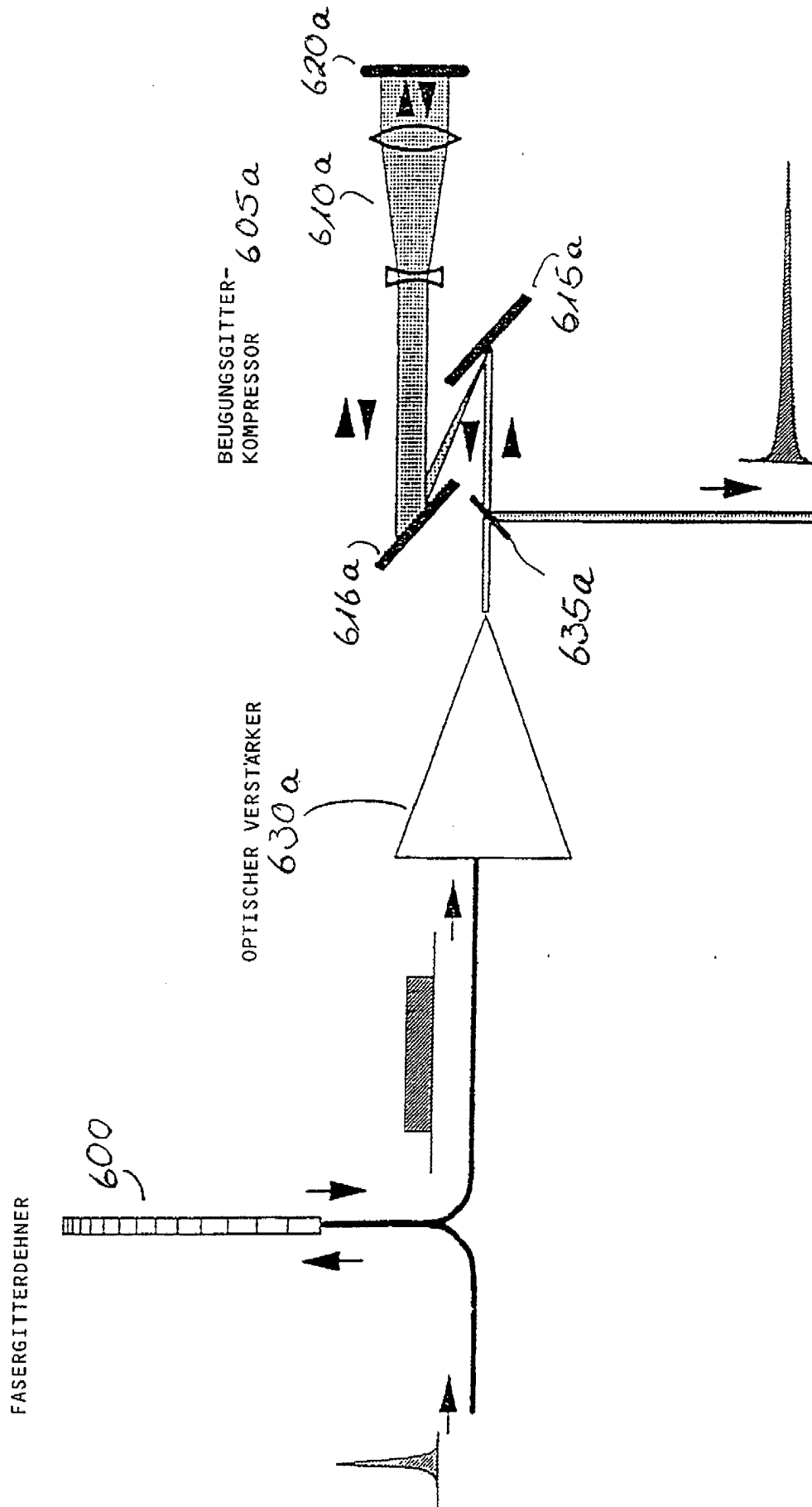


Fig. 6 (a)

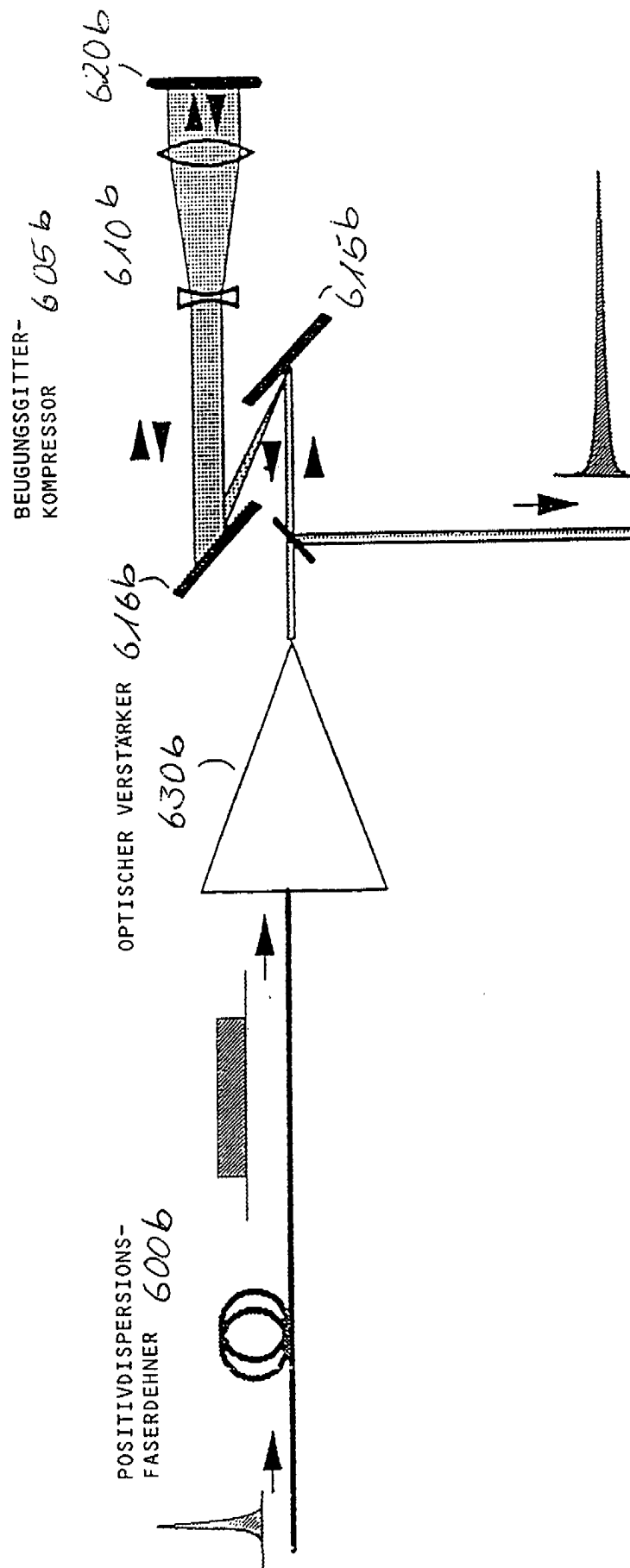


Fig. 6 (b)

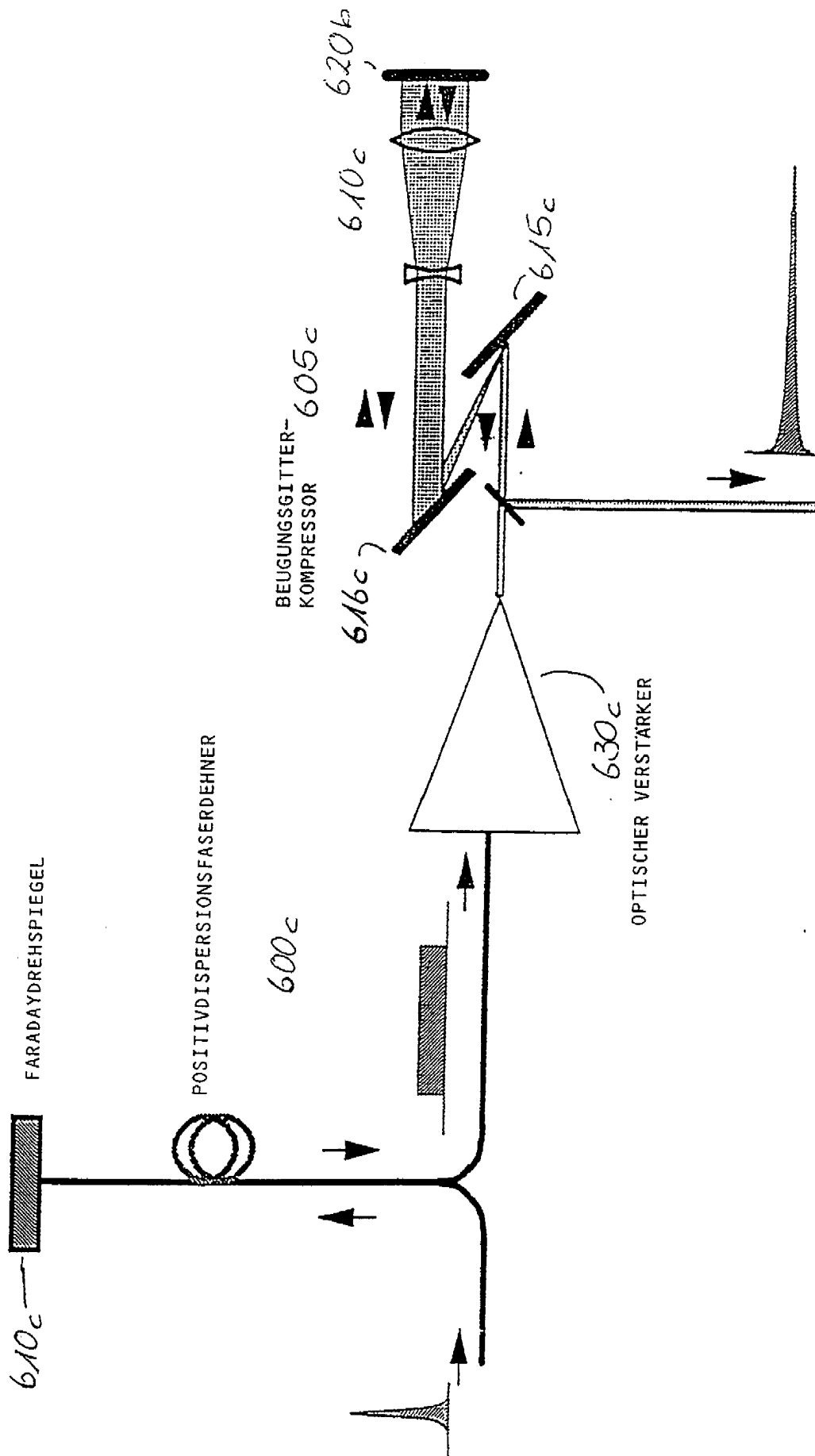


Fig. 6 (c)

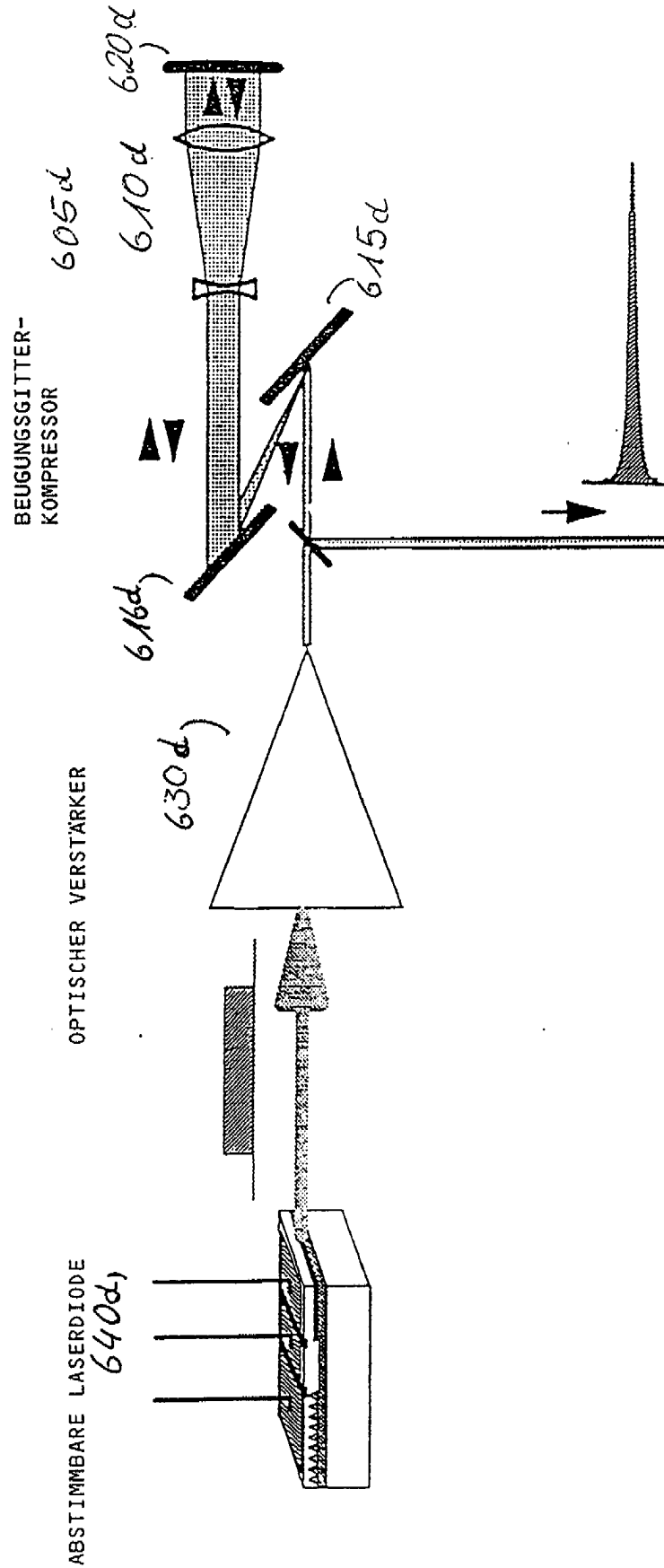


Fig. 6 (d)

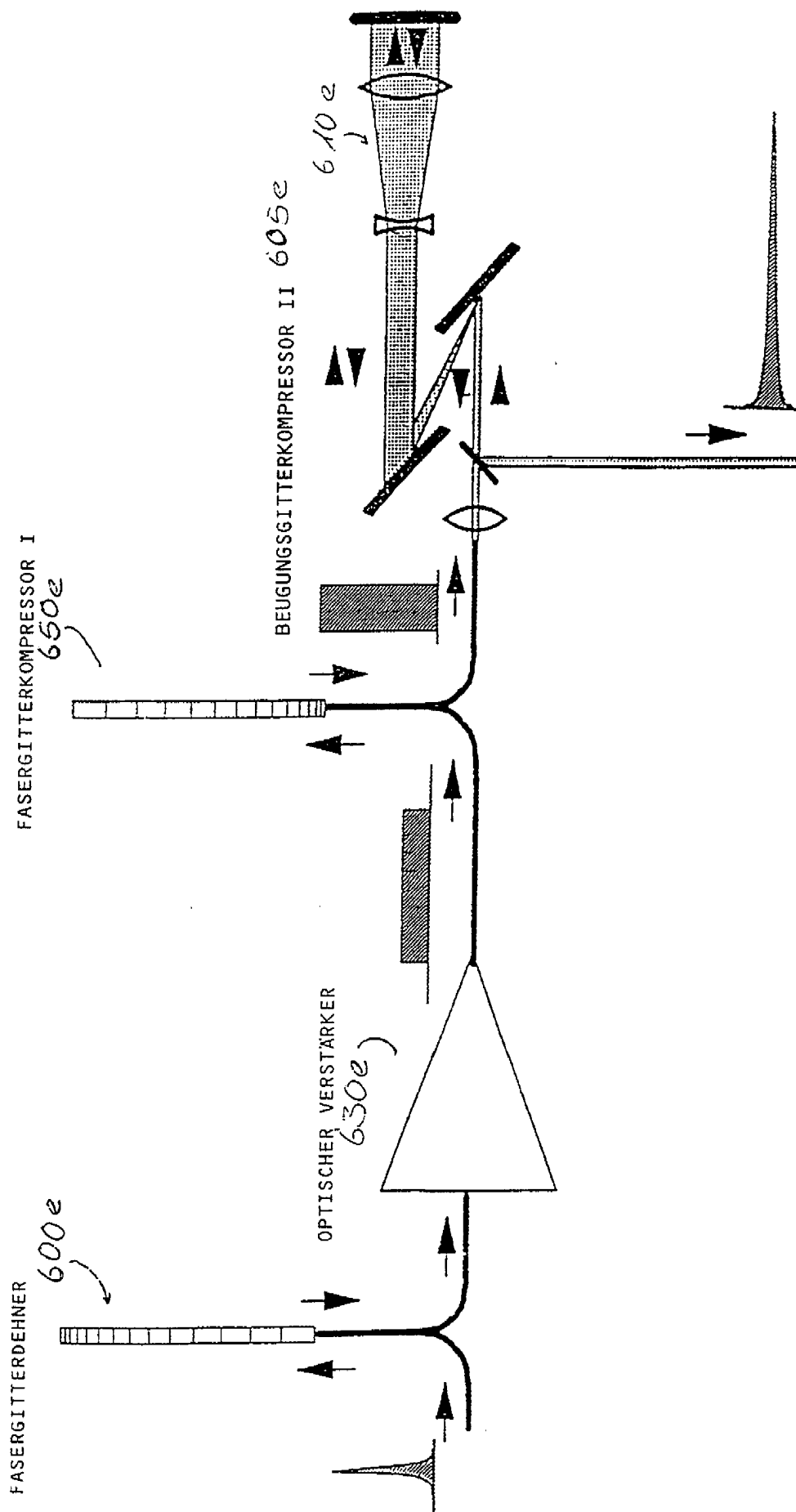


Fig. 6 (e)

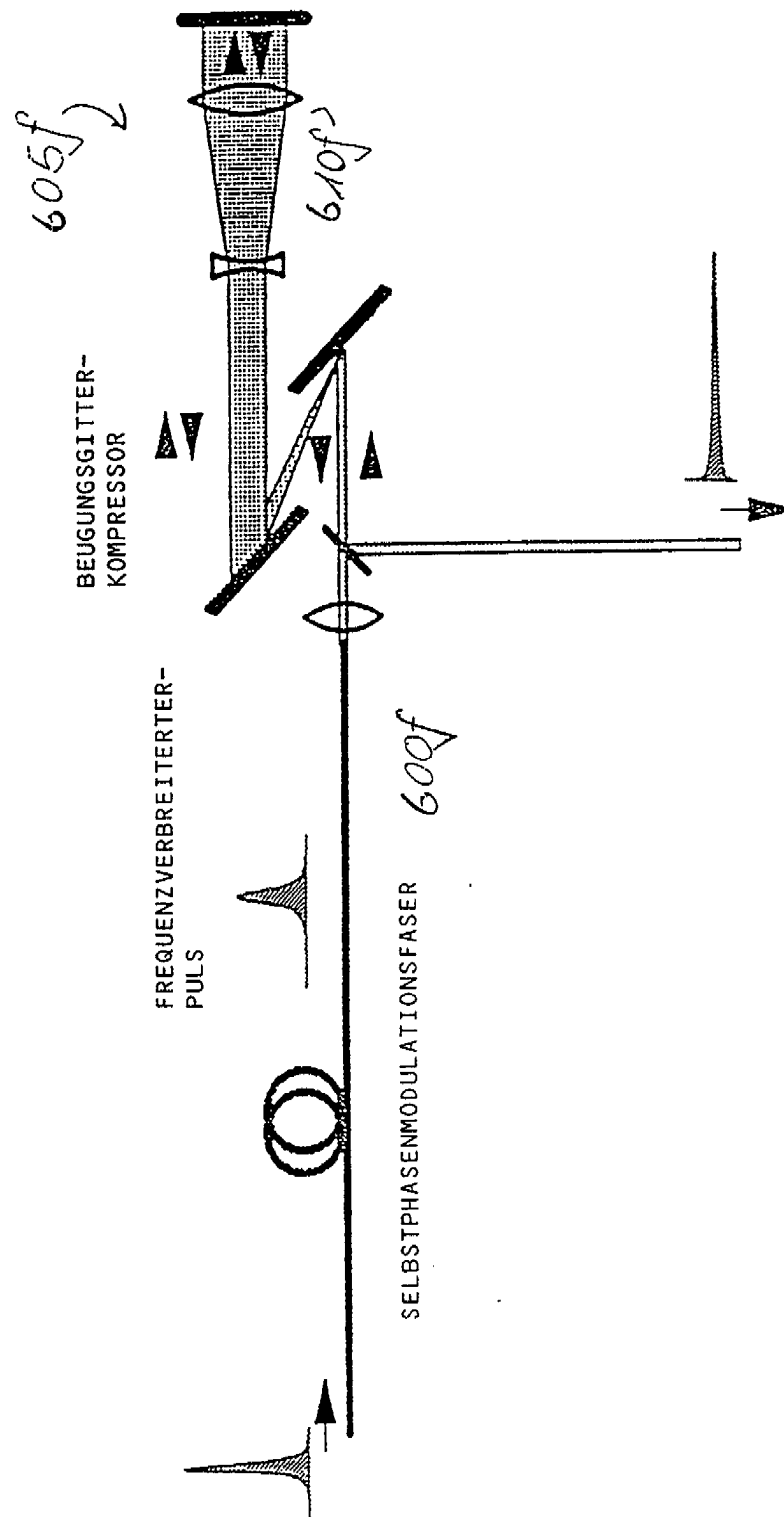


Fig. 6 (f)

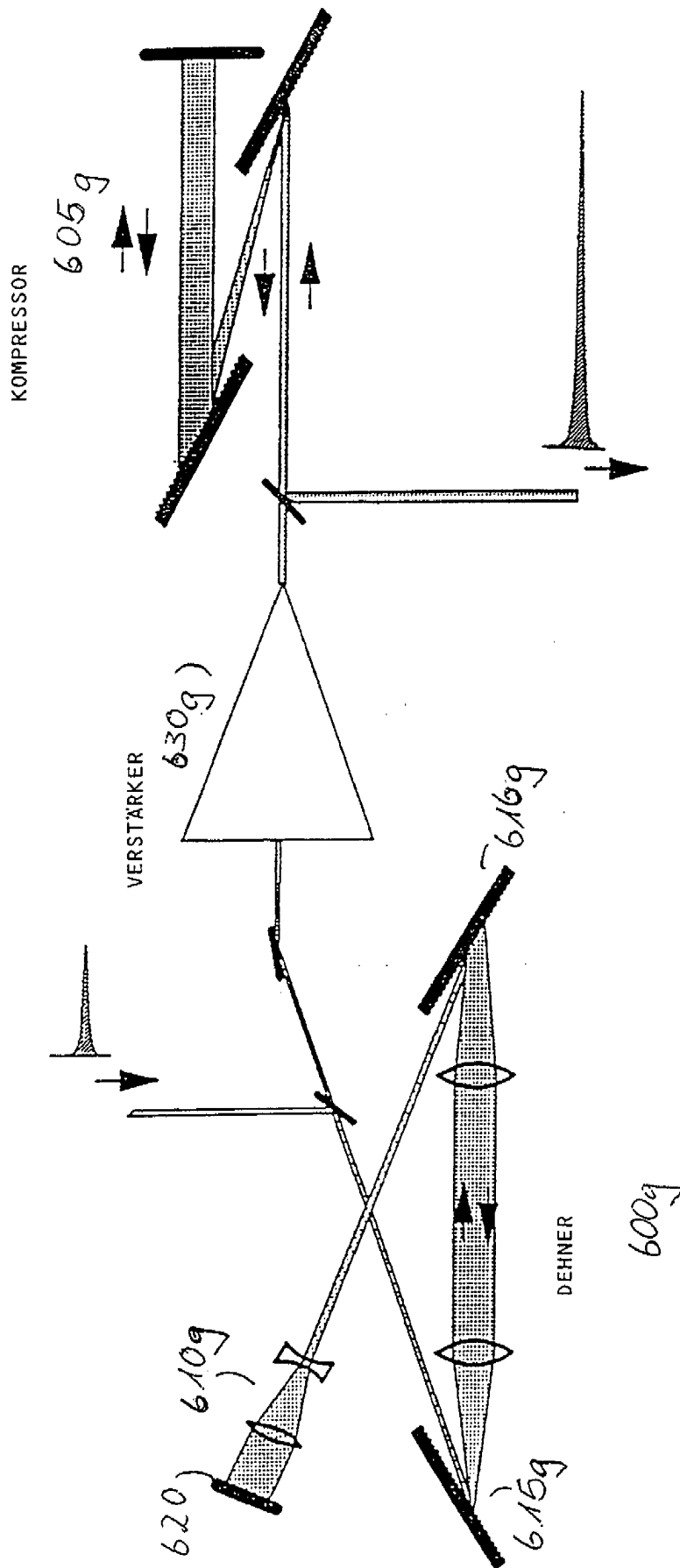


Fig. 6 (g)



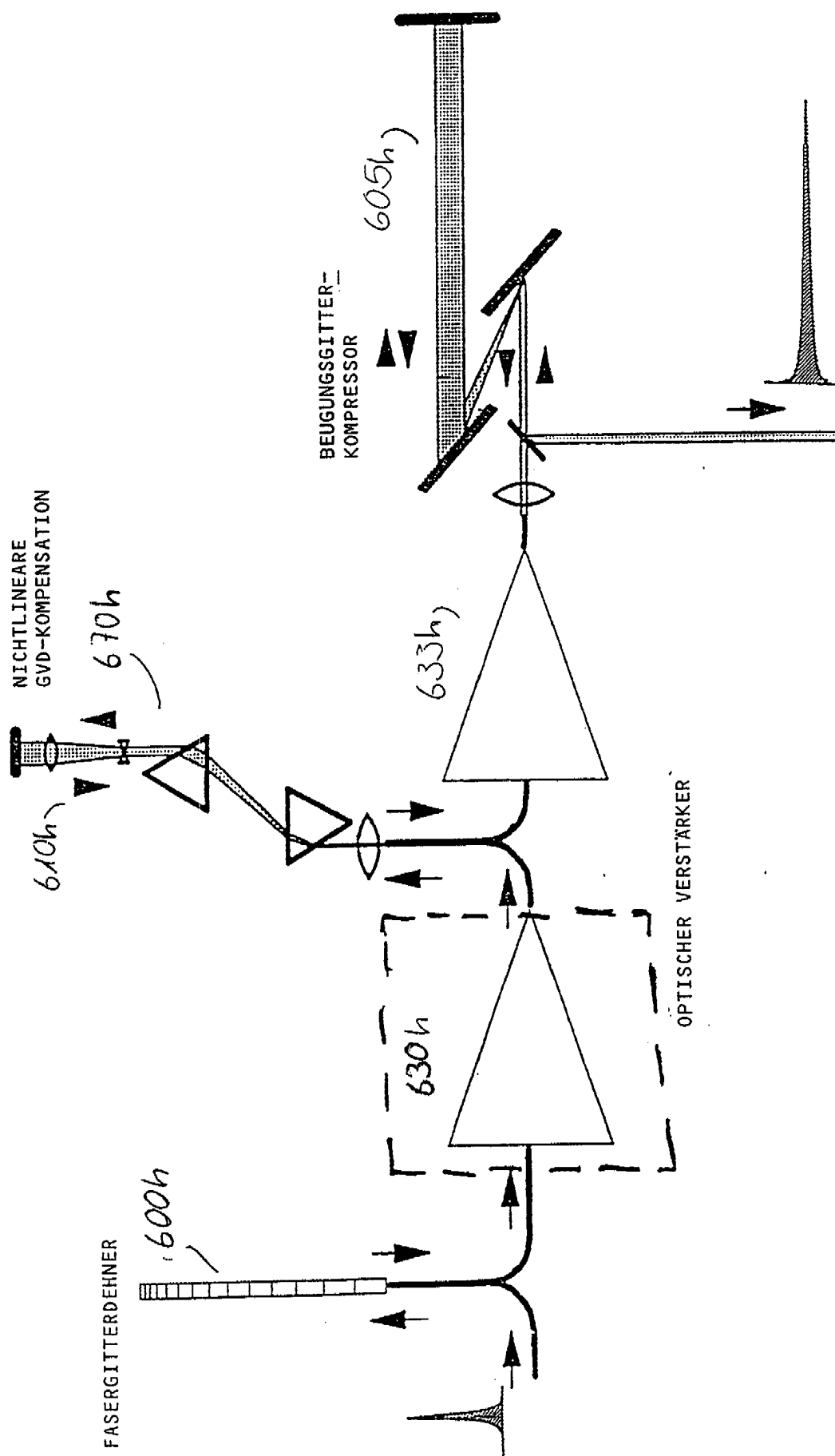


Fig. 6 (h)

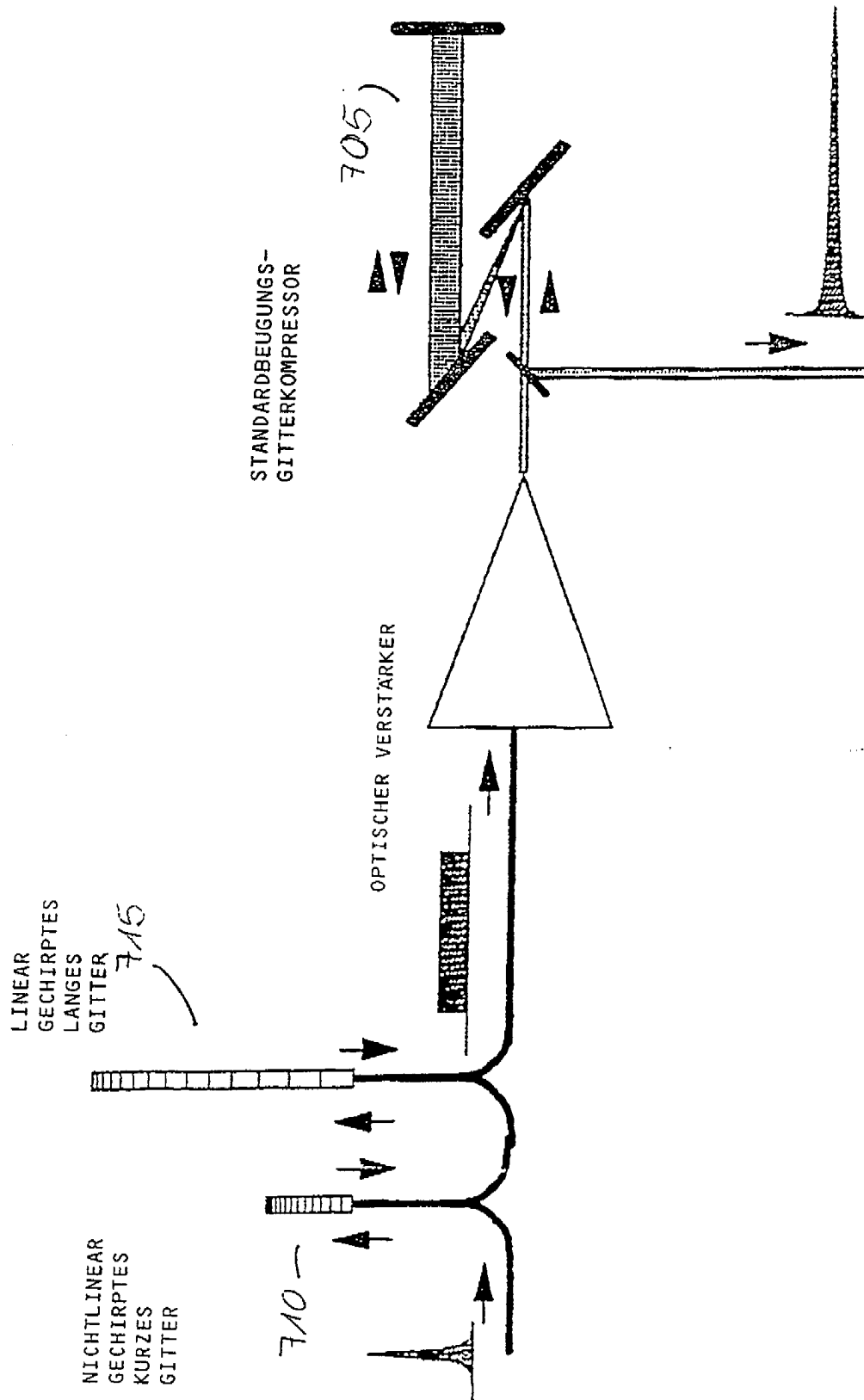


Fig. 7

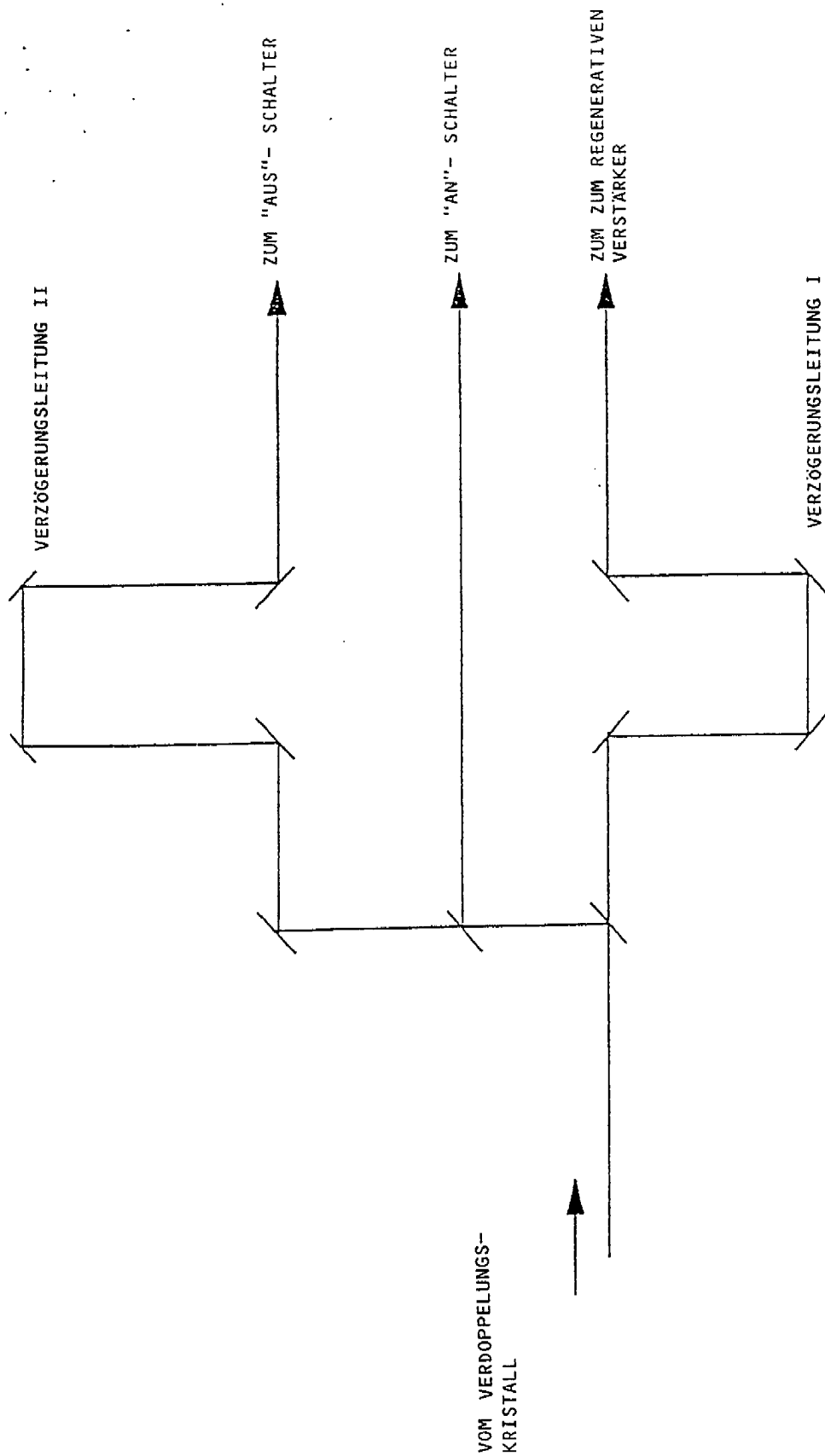


Fig. 8

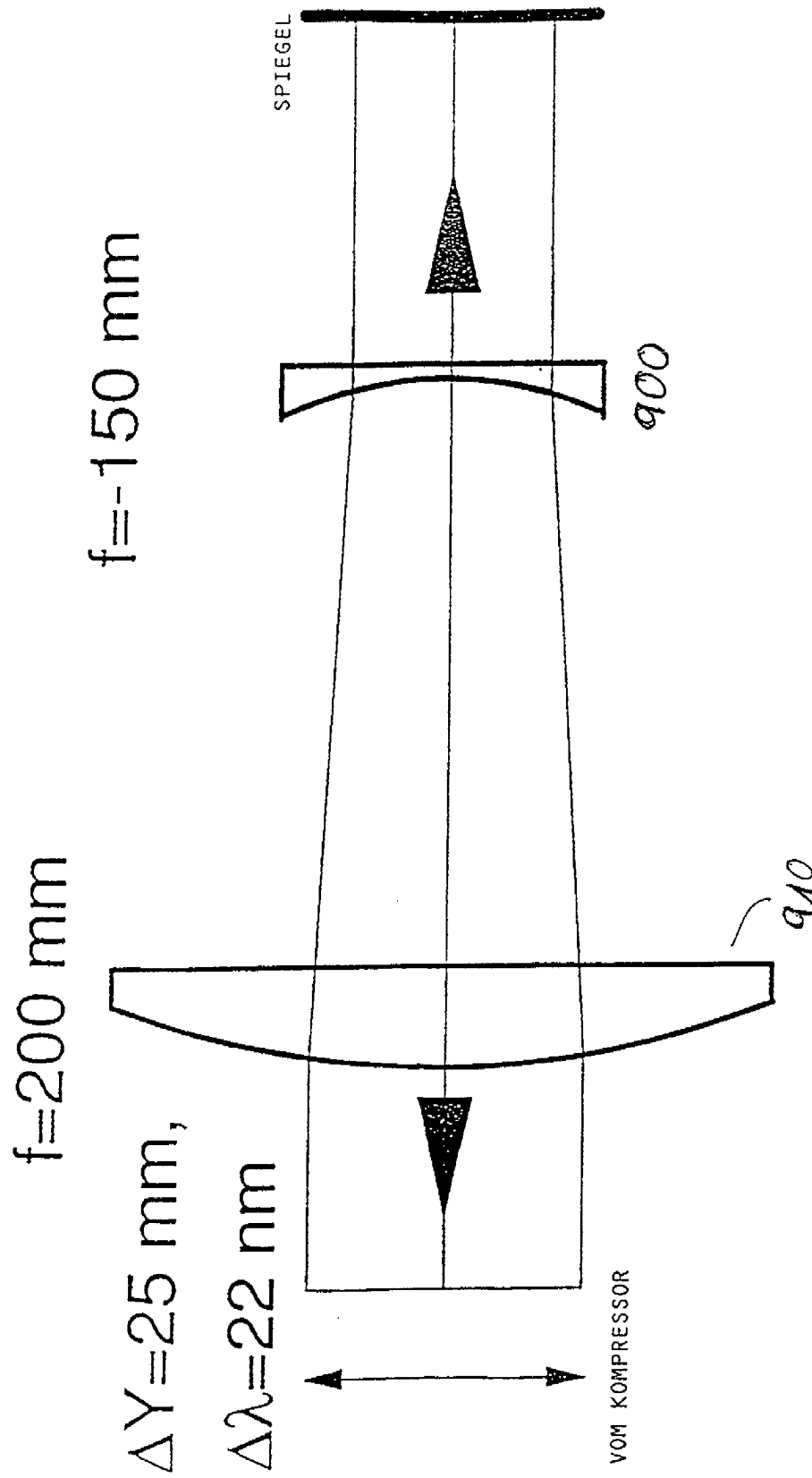


Fig. 9 (a)

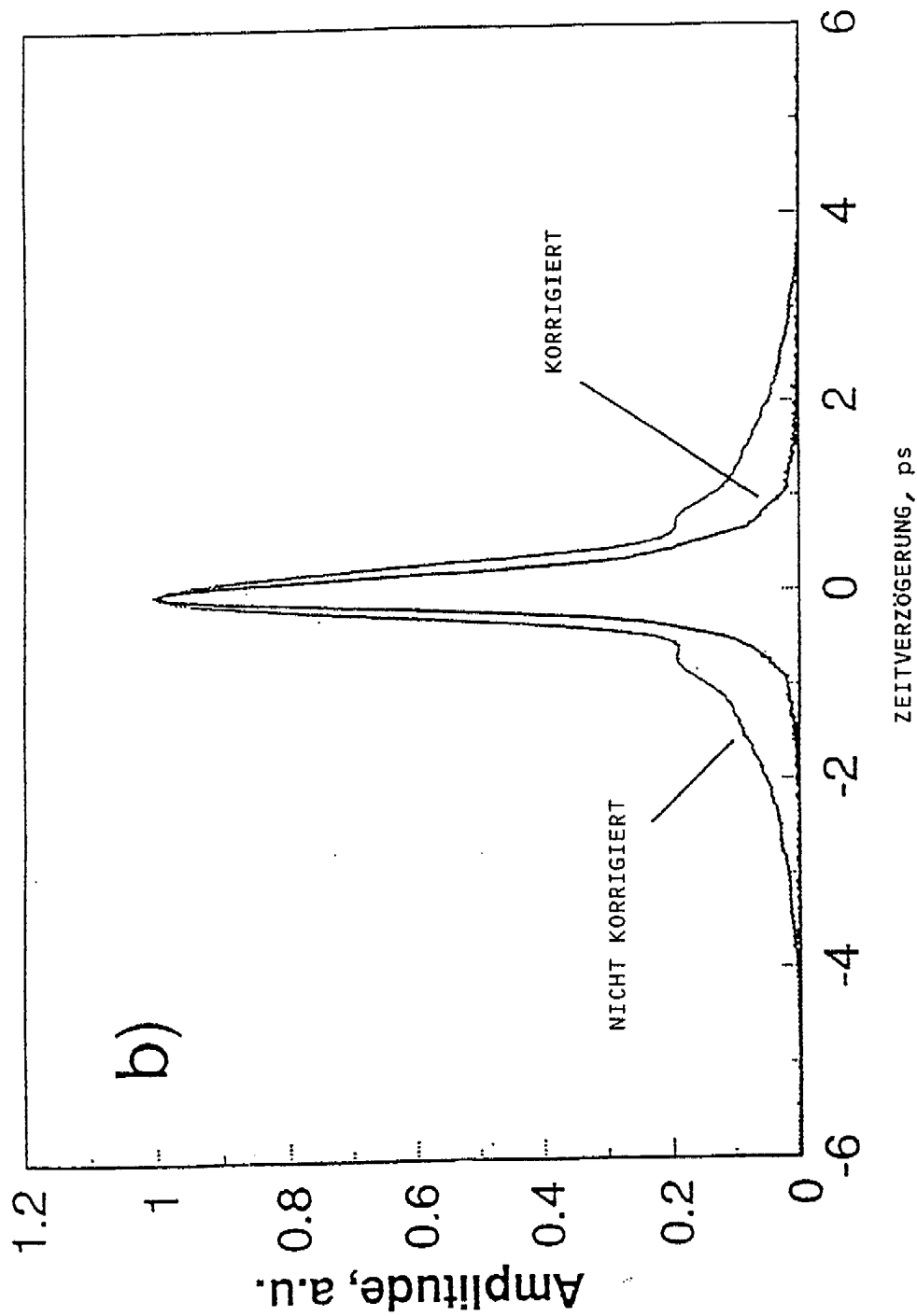


Fig. 9 (b)

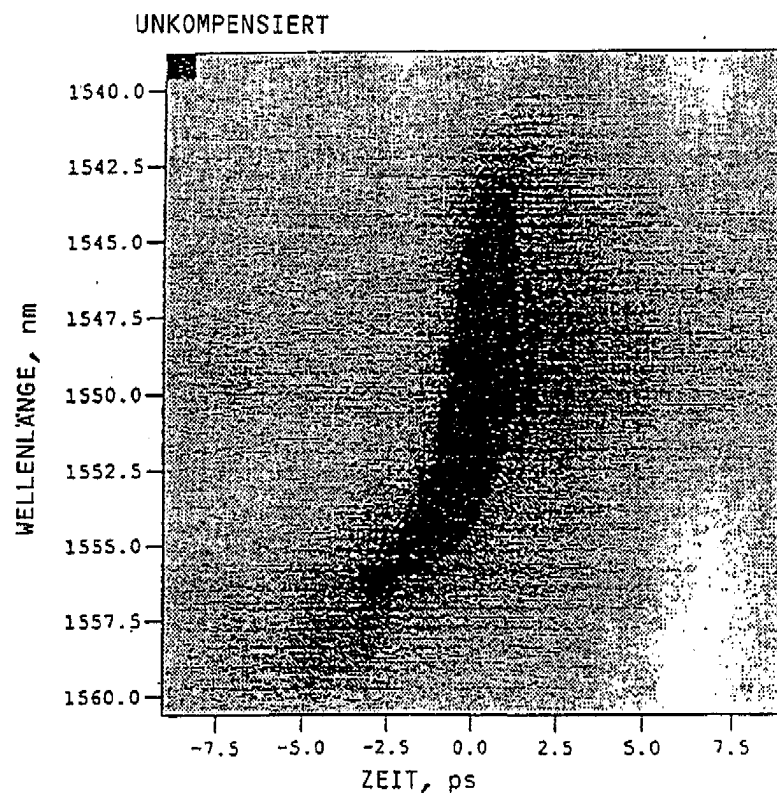
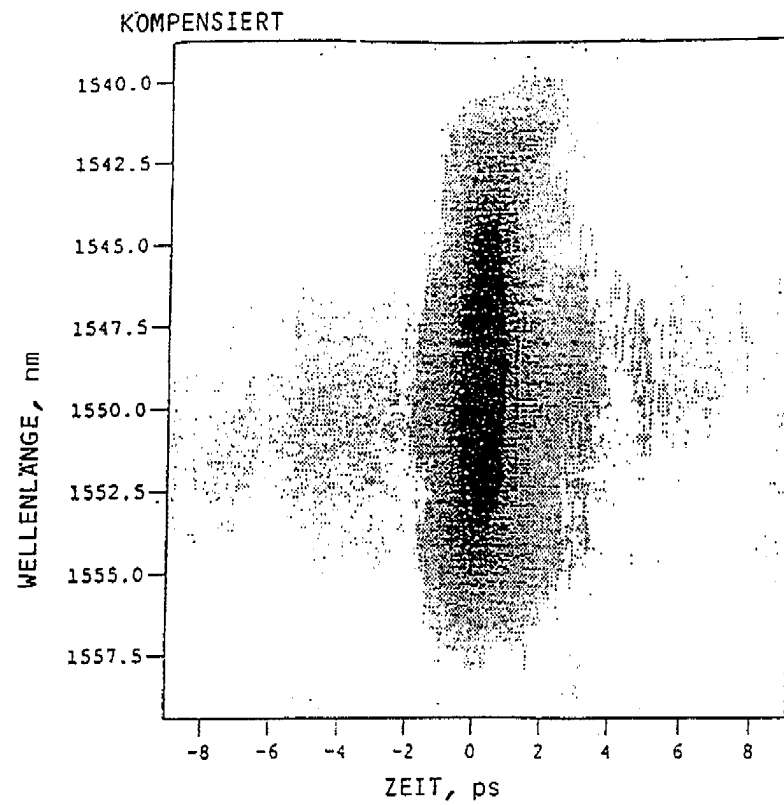


Fig. 9 (c)

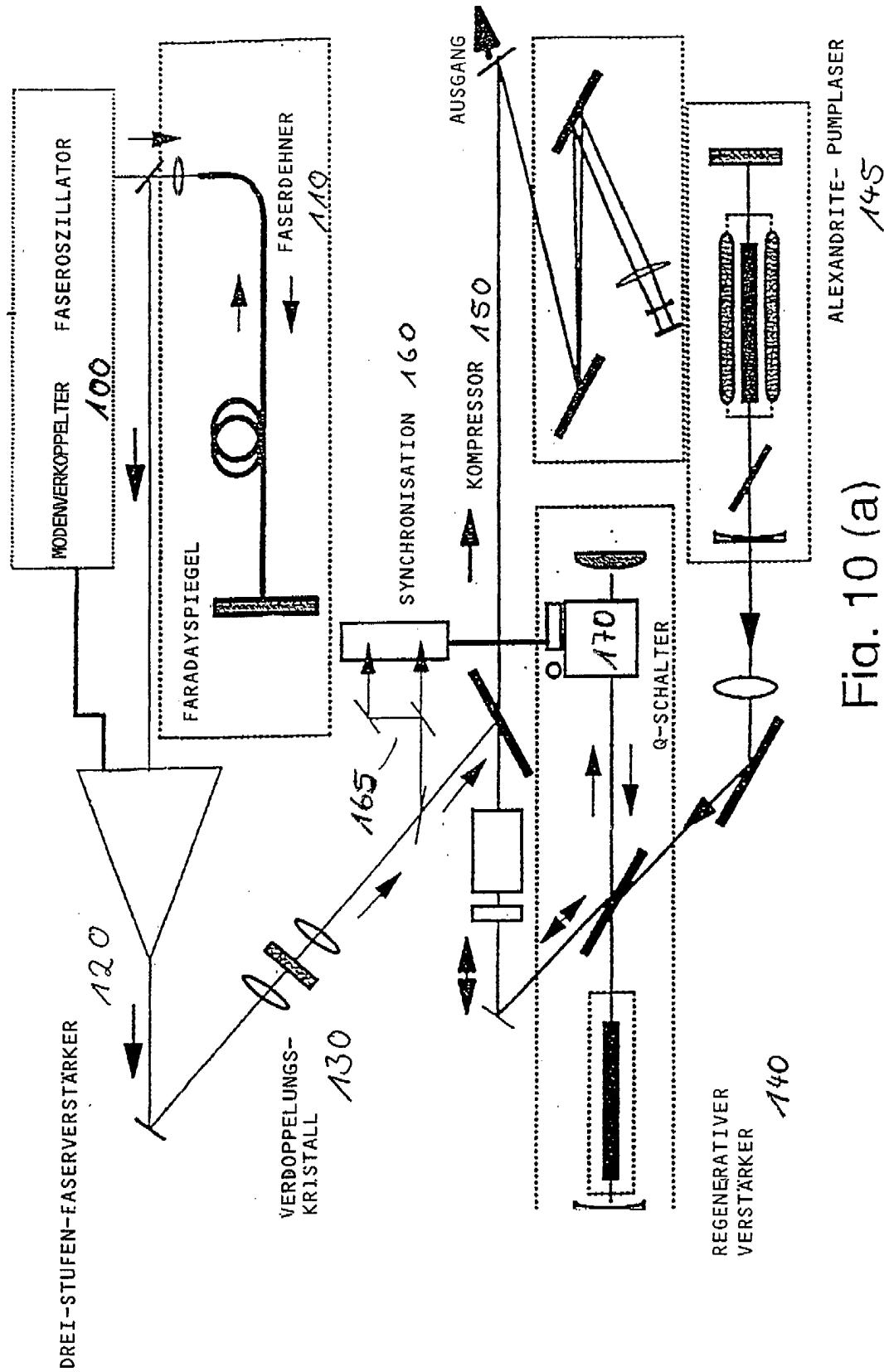


Fig. 10 (a)

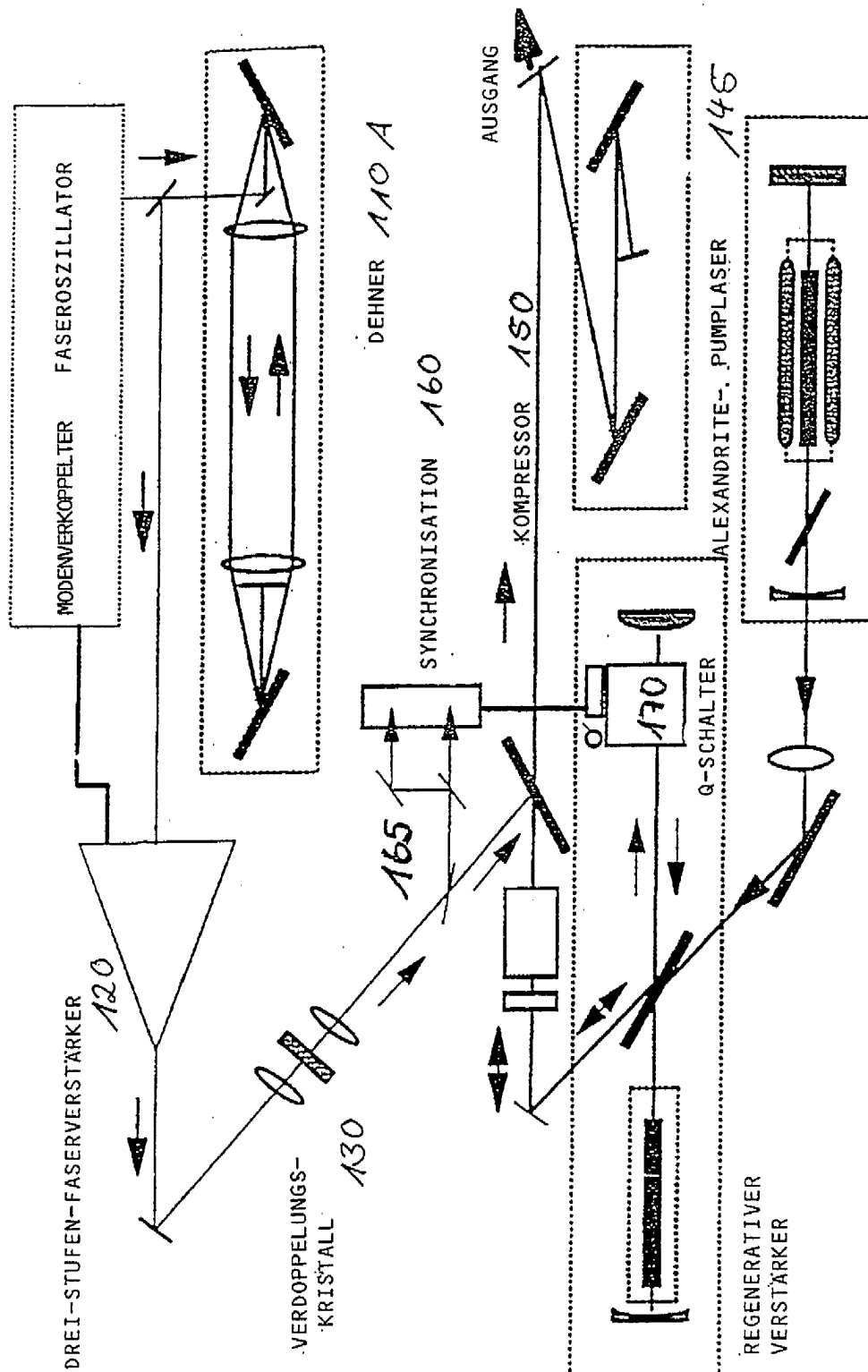


Fig. 10 (b)



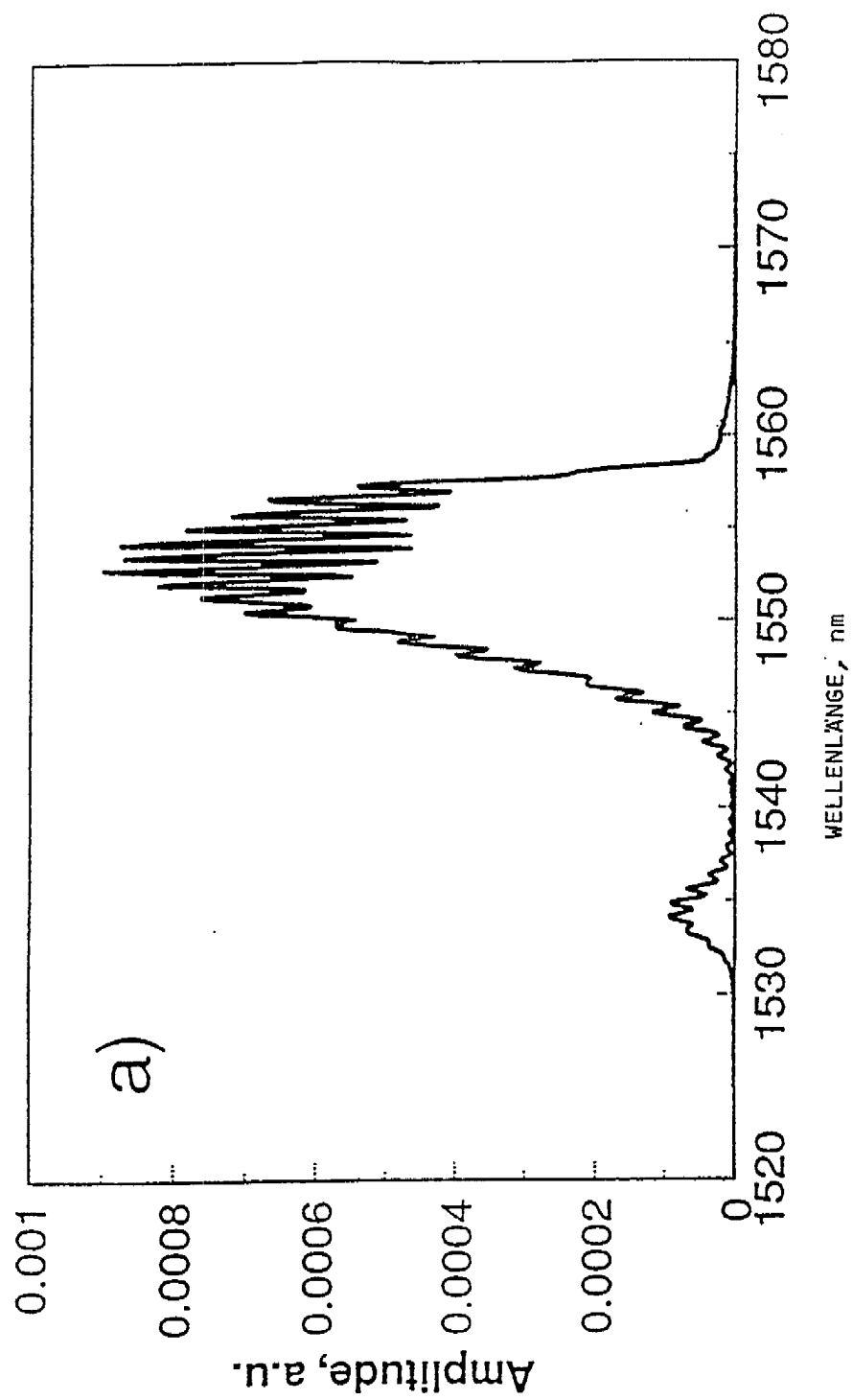


Fig. 11 (a)

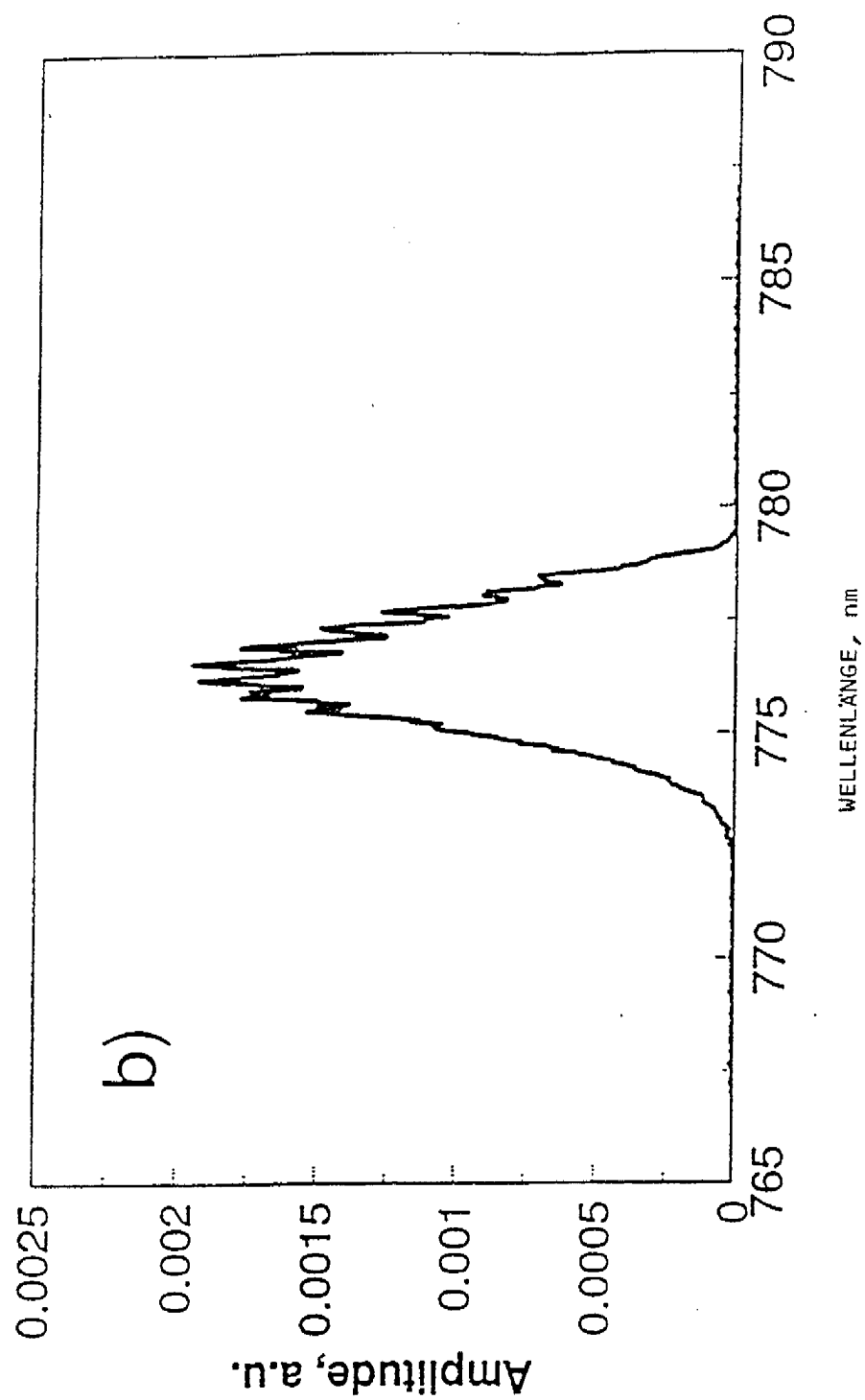


Fig. 11 (b)